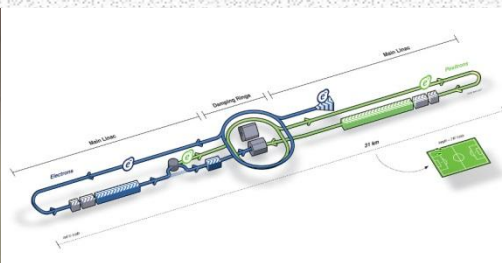
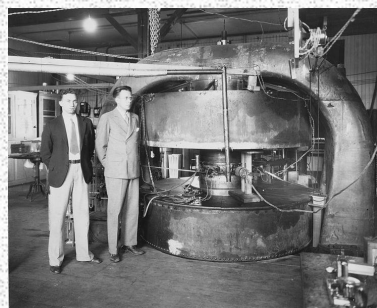


ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК

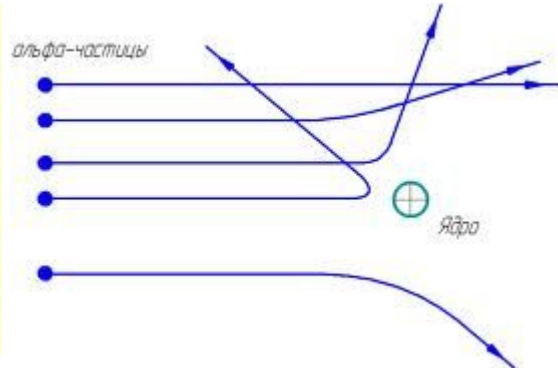
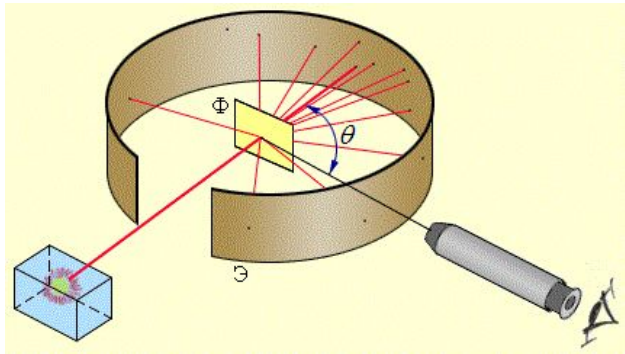
Лекція №1
ВСТУП




Задачі:

1. Фундаментальні дослідження – вивчення структури ядра та механізмів ядерних реакцій
2. Прикладні використання (медицина, промислові використання та інше) – як важливе доповнення до першої задачі

Обмеження природних джерел частинок для бомбардування ядер

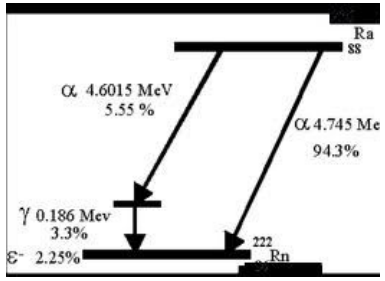
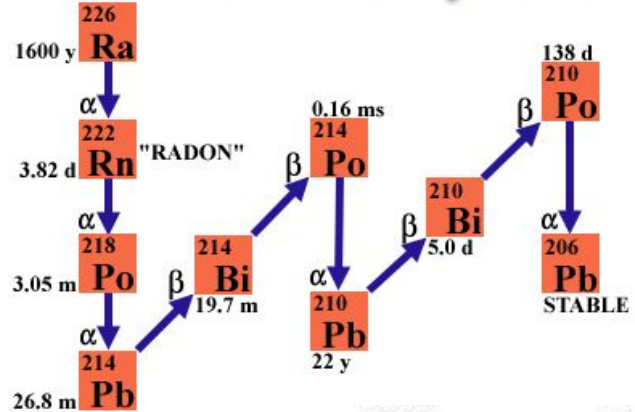


Ernest Rutherford (1871-1937)



- Ernest Rutherford, британський фізик, лауреат Нобелівської премії з хімії (1908).
- Резерфорд відомий перед усім експериментами з розсіювання альфа-частинок (Резерфордівське розсіювання), завдяки якому він встановив структуру атома, як системи, що складається із малого за розмірами позитивно зарядженого ядра й електронів.

Radium-226 Decay Chain



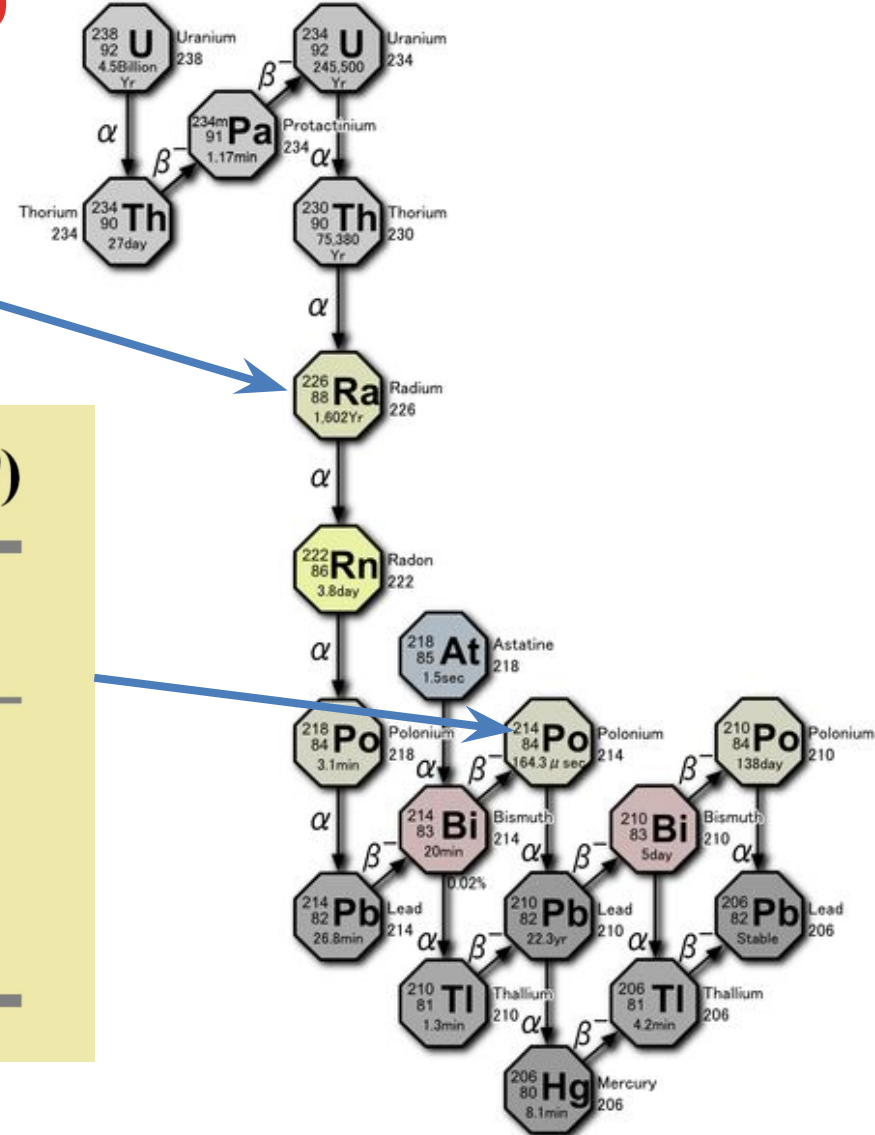
- Thorium 232
- ↓
- Radium 228
- ↓
- Actinium 228
- ↓
- Thorium 228
- ↓
- Radium 224
- ↓
- Radon 220
- ↓
- Polonium 216
- ↓
- Lead 212
- ↓
- Bismuth 212
- ↓
- Polonium 212
- ↓
- Lead 208

Thorium	${}_{90}\text{Th}^{232}$	1.41×10^y	3.95 (24%) 4.01 (76%)
Mesothorium I	${}_{88}\text{Ra}^{228} (\text{MsTh}_1)$	6.7 y	none
Mesothorium II	${}_{89}\text{Ac}^{228} (\text{MsTh}_2)$	6.13 h	none
Radiothorium	${}_{90}\text{Th}^{228} (\text{RdTh})$	1.910 y	5.34 (28%) 5.43 (71%)
Thorium X	${}_{88}\text{Ra}^{224} (\text{ThX})$	3.64 d	5.45 (6%) 5.68 (94%)
Thoron (Em)	${}_{86}\text{Rn}^{220} (\text{Th})$	55 sec	6.29 (100%)
Thorium A	${}_{84}\text{Po}^{216} (\text{ThA})$	0.15 sec	6.78 (100%)
Thorium B	${}_{82}\text{Pb}^{212} (\text{ThB})$	10.64 h	none
Thorium C	${}_{83}\text{Bi}^{212} (\text{ThC})$	60.6 min	6.05 (25%) 6.09 (10%)
Thorium C ^I	${}_{84}\text{Po}^{212} (\text{ThC}^I)$	304 nano sec.	8.78 (100%)
Thorium C ^{II}	${}_{81}\text{Tl}^{208} (\text{ThC}^{II})$	3.10 min	none
Thorium D	${}_{82}\text{Pb}^{208} (\text{ThD})$	Stable	none

Обмеження природних джерел частинок для бомбардування ядер

^{226}Ra

^{214}Po



Alphas from ^{214}Po (164.3 us 20)

$E\alpha$ (keV)

$I\alpha$ (%)

6609.9 10

6.0E-5 20

6902.1 2

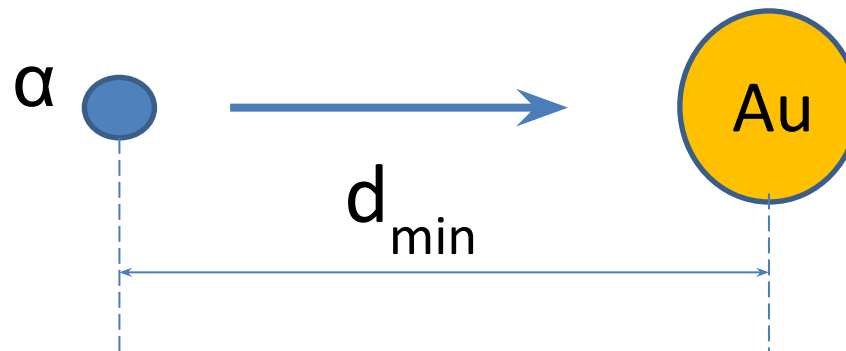
0.0104 6

7686.82 7

99.9895 6

Для вивчення ядра енергій частинок від природних радіоактивних джерел явно недостатньо (інтенсивності космічного випромінювання дуже низькі і не контрольовані)

^{226}Ra 7.7 MeV \longrightarrow $d_{\min} \approx 30$ фм

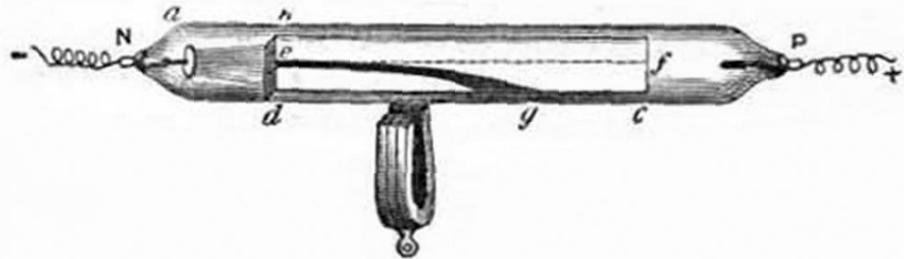


Історичні попередники (прискорення електронів)

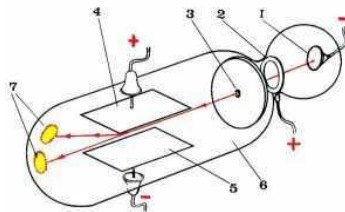
В 1853 році французький науковець А. Массон спробував пропускати електричні розряди (іскри) через скляну трубку, з якої відкачено повітря



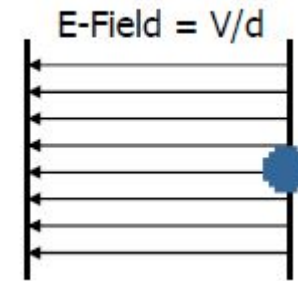
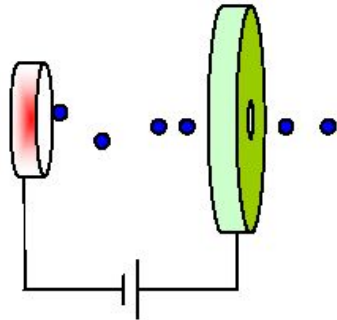
В 1870 році відкриття катодних променів англійським вченим Вільямом Круксом (William Crookes) – крукові трубки



В 1896-1897 роки - англійський фізик Дж. Дж. Томсон – схожа трубка, довів, що катодні промені – електрони, визначив для нього відношення його заряду до маси



Прості формули в основі



$$eV = E_{kin} \\ = (\gamma - 1)mc^2$$

$$F = eE = e \frac{V}{d} \\ Fd = E_{kin} = eV$$

$$v = \sqrt{1 - \left(\frac{mc^2}{eV + mc^2} \right)^2} \cdot c < c$$

Energie [eV]	Energie [Joule]	Velocity Electron [511keV/c ²]	Velocity Proton [938 MeV/c ²]
1 eV	1.6×10^{-19} J	593 km/s 0.002 c	14 km/s 0.00005 c
1 keV	1.6×10^{-16} J	18730 km/s 0.062 c	438 km/s 0.0015 c
1 MeV	1.6×10^{-13} J	282128 km/s 0.94 c	13832 km/s 0.046 c
1 GeV	1.6×10^{-10} J	299792 km/s 0.9999998 c	262338 km/s 0.88 c
1 TeV	1.6×10^{-7} J	299792 km/s 0.99999999999998 c	299792 km/s 0.9999996 c
7 TeV	1.1×10^{-8} J	299792 km/s 0.9999999999999997 c	299792 km/s 0.999999991 c

Basic Formalism

Energy

$$E = E_0 + E_{kin}$$

- ◆ Rest Energy:

$$E_0 = m_0 c^2$$

- ◆ Relativistic Parameter:

$$\gamma = E / E_0$$

- ◆ Velocity:

$$v = \beta c$$

- ◆ Relativistic Mass:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma m_0$$

- ◆ Energy in eV:

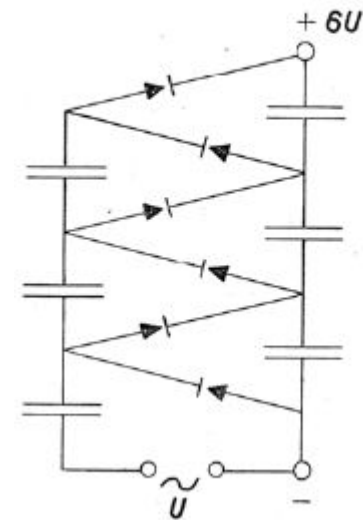
$$1eV = 0.16 \cdot 10^{-18} J$$

(Electron rest mass $9.1 \cdot 10^{-31} \text{kg}$ gives a rest energy of 511 keV)

Каскадний прискорювач генератор Кокрофта – Уолта (Cockroft-Walton)



1932



Greinacher cascade

Каскадний перемножувач
напруги

Каскадний прискорювач генератор Кокрофта – Уолта (Cockroft-Walton)



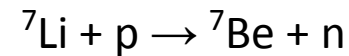
Sir John Douglas Cockcroft
* 27 May 1897, Todmorden ,UK
† 18 September 1967, Cambridge, UK



Ernest Thomas Sinton Walton
* 6 October 1903, Dungarvan, Ireland
† 25 June 1995, Belfast, Ireland

700 (800)

Протони з енергією 400 кВ



УФТІ, 10 жовтня 1932, ЕСГ,
К.Синельников, А.
Лейпунський, А.Вальтер, А.
Латишев

Nobel Price 1951

"for their pioneer work on the
transmutation of atomic nuclei by
artificially accelerated atomic particles"

Трансмутація атомних ядер з
використанням прискорених
атомних частинок

Каскадний прискорювач генератор Кокрофта –Уолта (Cockroft-Walton)

Acceleration with an electrostatic field

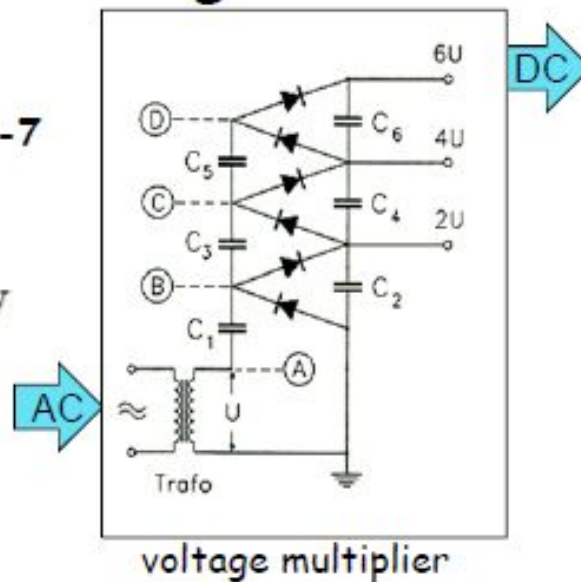
Cockcroft-Walton generator

(1932)

400 keV p → Lithium-7

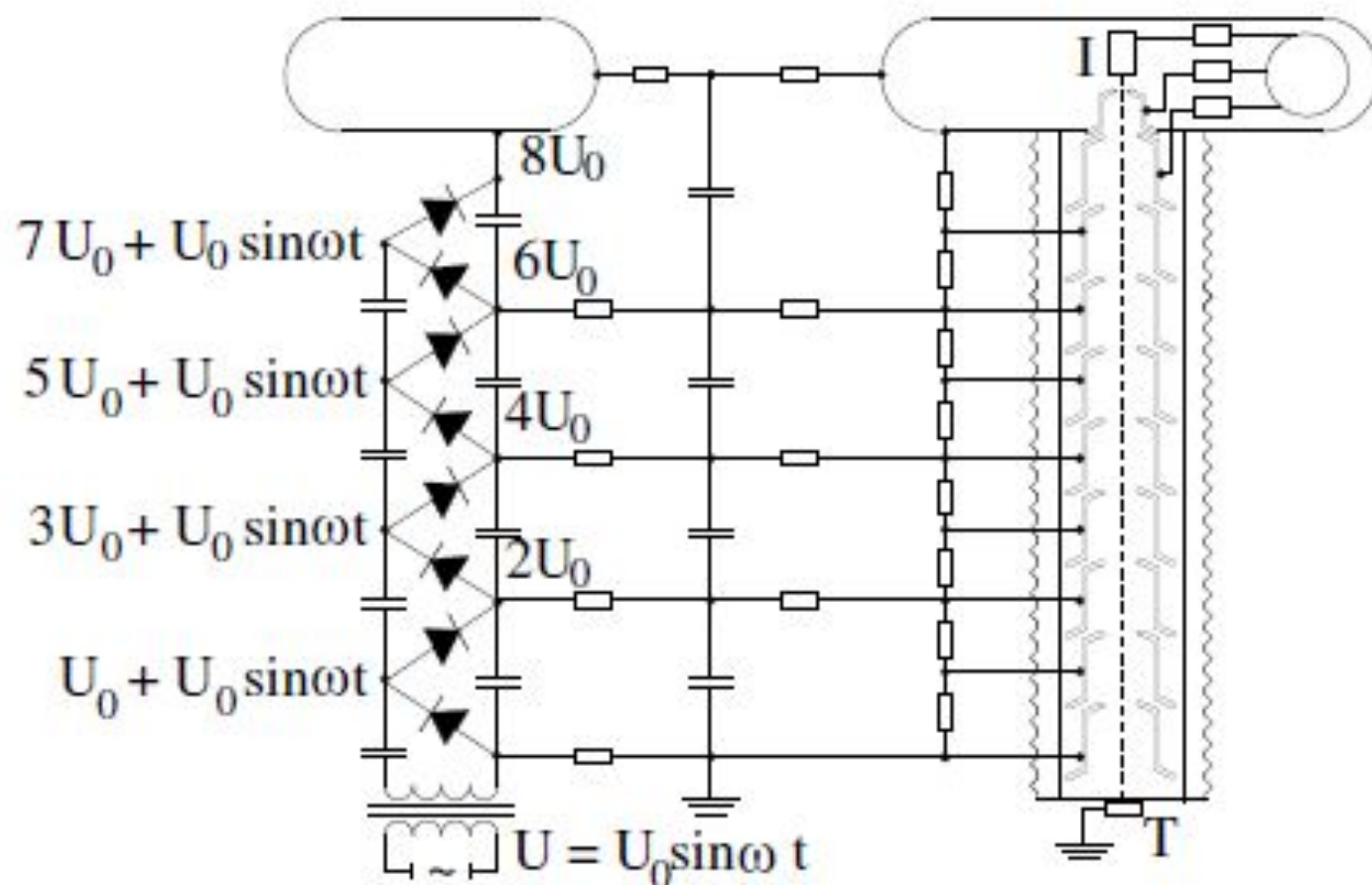


$^4\text{He} + ^4\text{He} + 17,35 \text{ MeV}$

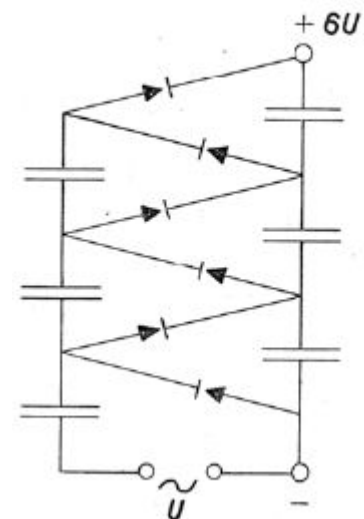
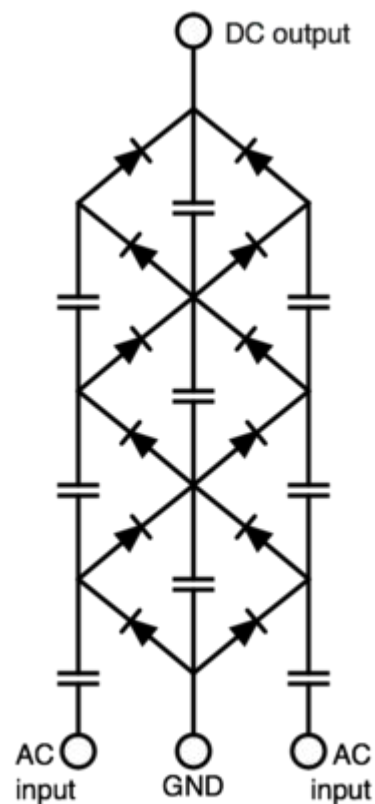


maximum voltage < 1 MV

Каскадний прискорювач генератор Кокрофта – Уолта (Cockroft-Walton)

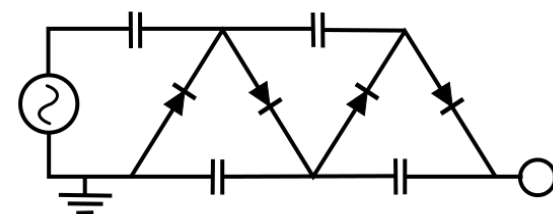


Каскадний перемножувач – схема Грейнахера (Грайнахер-Greinacher)



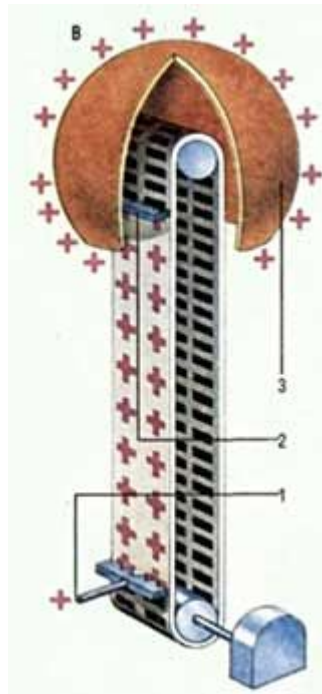
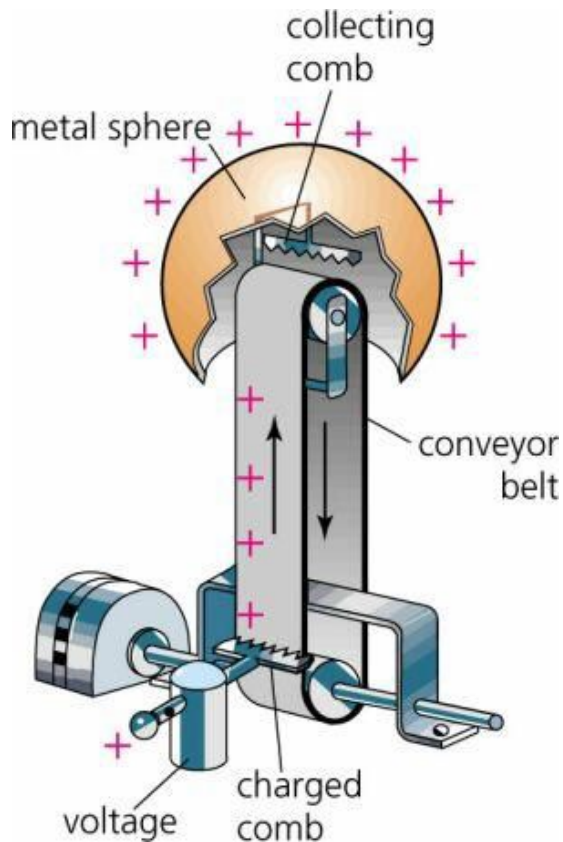
Greinacher cascade

Каскадний перемножувач
напруги



Електростатичний генератор (ЕСГ) (Високовольтний генератор Ван-де-Граафа)

High voltage generation: Van de Graaff Generator



High voltage generation: Van de Graaff Generator

Robert Jemison Van de Graaff

20 December 1901

16 January 1967



associate professor,
Massachusetts
Institute of
Technology (MIT)

Перші генератори

1929 рік - 80 кВ
(з допомогою
Nicholas Burke,
Princeton University)

1932 рік - 1 МВ

1933 рік - 7 МВ

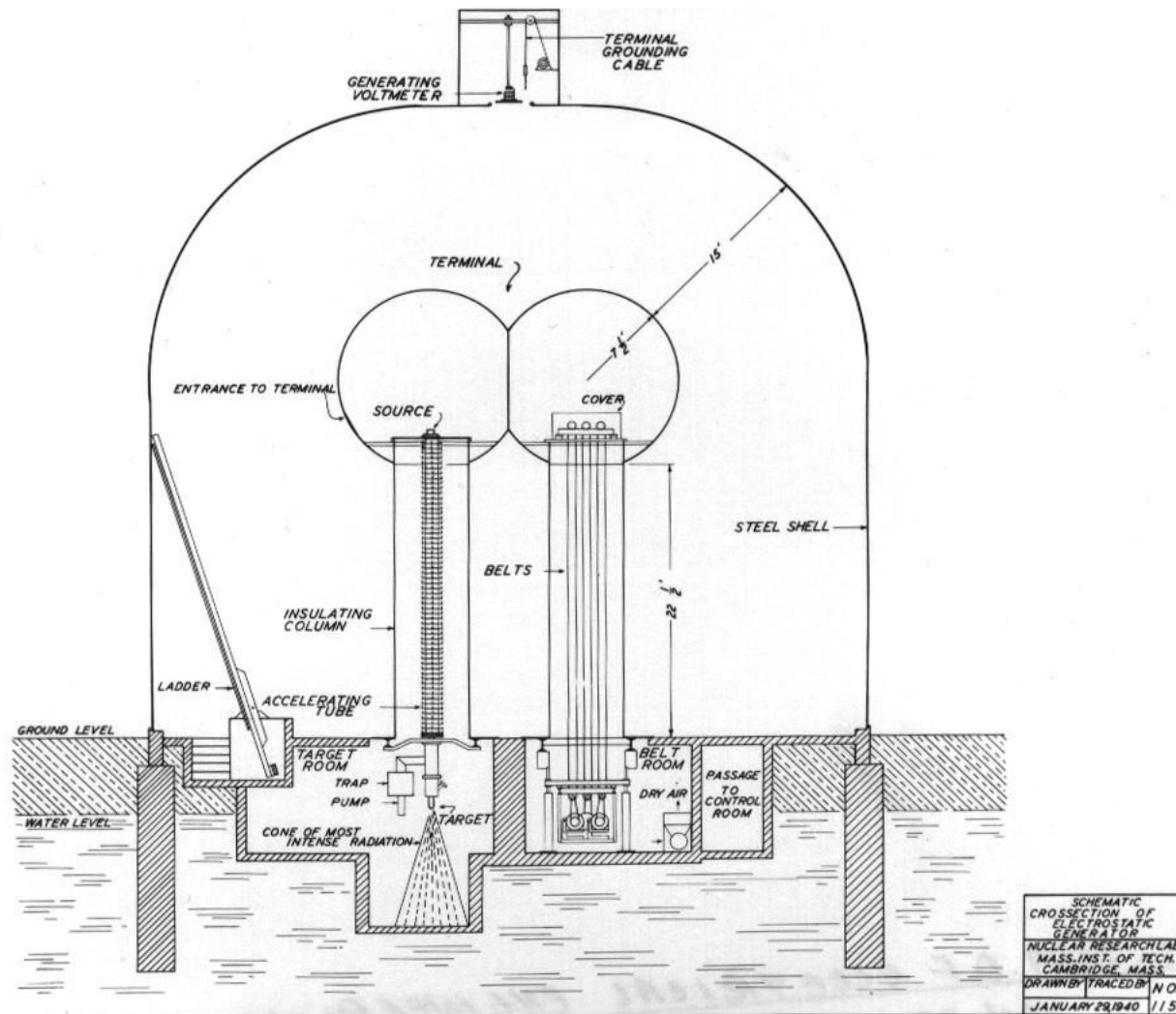


УФТІ, 10 жовтня 1932, ЕСГ,
К.Синельников, А.
Лейпунський, А.Вальтер, А.

Латишев
 ${}^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$



Електростатичний генератор (ЕСГ) - Високовольтний генератор Ван-де-Граафа



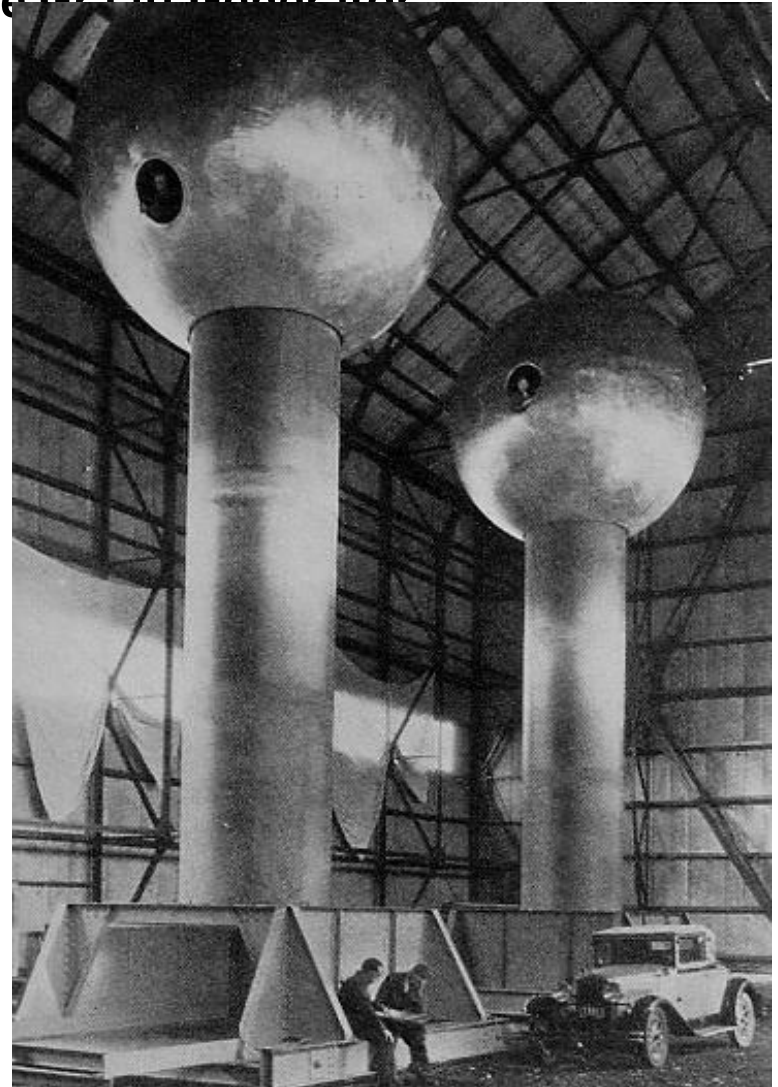
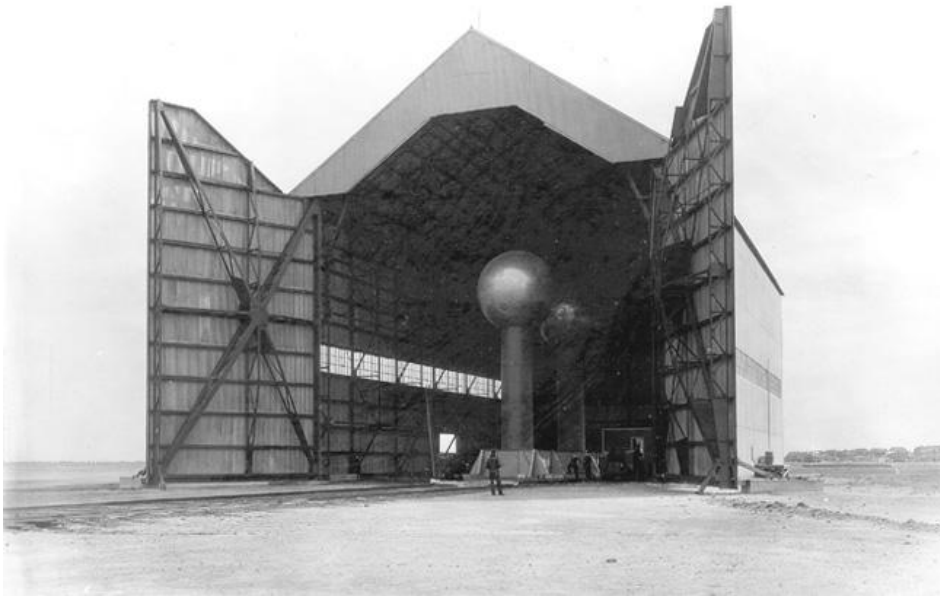
CUTAWAY DIAGRAM OF THE GENERATOR AT MIT
 SHOWING X-RAY PRODUCTION DOWN LEFT COLUMN

©MIT Museum
 All rights reserved

Електростатичний генератор (ЕСГ) - Високовольтний генератор Ван-де-Граафа

High voltage generation: Van de Graaff Generator

Ван-де-Грааф прискорювач МІТ.
Почали будувати до другої світової війни – запустили на повну енергію 10 MeV вже після війни.
Сфери в діаметрі 15 футів, обладнання в сферах на висоті 43



High voltage generation: Van de Graaff Generator

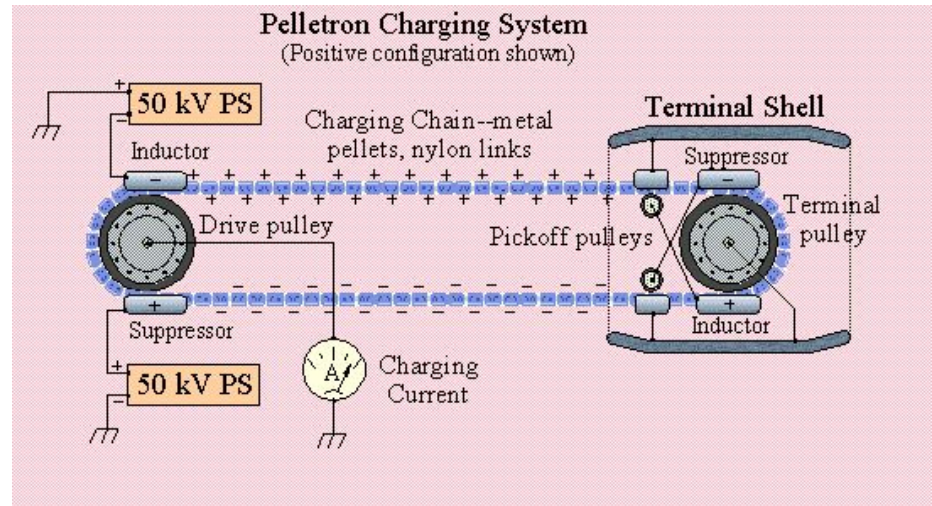


Koffler accelerator at the Weizmann Institute of Science, Rehovot Israel

14 MV Pelletron

Accelerator Mass Spectrometry (AMS) with

14C, 7Be, 10Be, 26Al, 36Cl, 41Ca,
44Ti, 59Ni, 90Sr, 129I, 236U, 239Pu,
240Pu, 242Pu, 244Pu



High voltage generation: Van de Graaff Generator

[Відео](#)

[1](#)

[Відео](#)

[2](#)

[Відео](#)

[3](#)

[Відео](#)

[4](#)

[Відео](#)

[5](#)

[Відео](#)

[6](#)

[Відео](#)

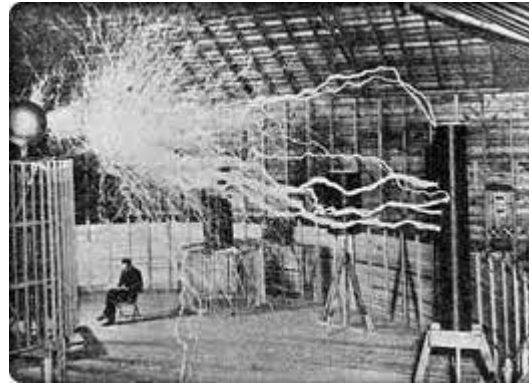
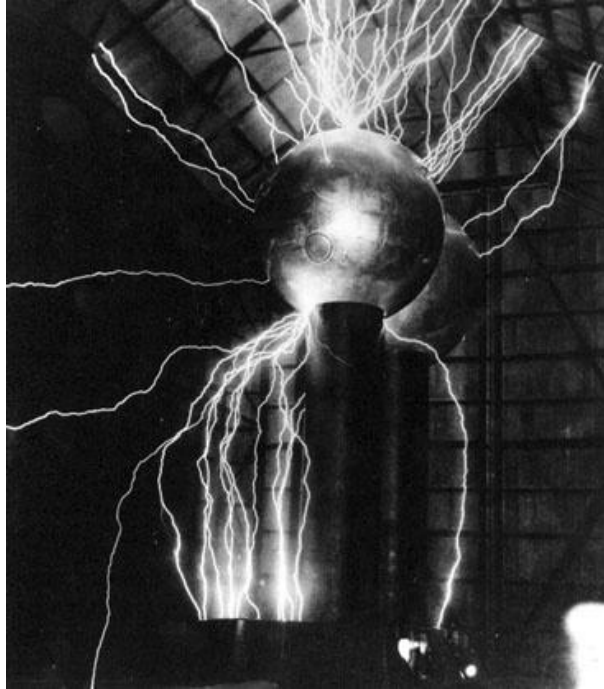
[7](#)

Високовольтні пробої в повітрі –
Швидкий кінець епохи прискорювачів прямої дії -
каскадних та електростатичних (Ван-де-Граафа) – і розквіт
любителів блискавок



<http://tesladownder.com/>

Високовольтні пробої в повітрі – Швидкий кінець епохи прискорювачів прямої дії - каскадних та електростатичних (Ван-де-Граафа)



Сухий азот Еле-газ



ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ

- Одним из самых перспективных изолирующих материалов в электроэнергетике является высокопрочный газ – **элегаз**.
- **Элегаз** – шестифтористая сера – газ с ярко выраженными электроотрицательными свойствами.



ЕЛЕГ

Гексафторид сірки (елегаз або шестифториста сірка, SF₆)

АЗ

неорганічна речовина, при нормальних умовах важкий газ, в 5 разів важчий за повітря.

Практично безбарвний газ,

має високу пробивну напругу (89 кВ/см). Електрична міцність елегазу залежить від тиску, вона в 2-4 рази вище, ніж у повітря.

Назва «елегаз» шестифториста сірка отримала від скорочення «електричний газ»

Електрична міцність при атмосферному тиску і зазорі 1 см становить $E = 89$ кВ/см

У центрі молекули елегазу розташований атом сірки, а на рівній відстані від нього в вершинах правильного октаедра розташовуються шість атомів фтору. Це визначає високу ефективність захоплення електронів молекулами, їх відносно велику довжину вільного пробігу і слабку

реакційну здатність. Тому елегаз має високу електричну міцність. **Елегаз нешкідливий у суміші з повітрям. Однак внаслідок порушення технології**

виробництва елегазу або його розкладання в апараті під дією електричних розрядів (дугового, коронного, часткових), в елегазі можуть виникати

надзвичайно активні в хімічному відношенні і шкідливі для людини

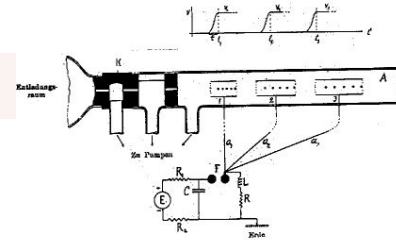
домішки, а також різні тверді з'єднання, що осідають на стінах конструкції.

Інтенсивність утворення таких домішок залежить від наявності в елегазі домішок кисню і особливо пари води.

Альтернатива прямому
прискоренню з
використанням високої
напруги – багатократне
прискорення відносно
низькою напругою – лінійні
та циклічні прискорювачі

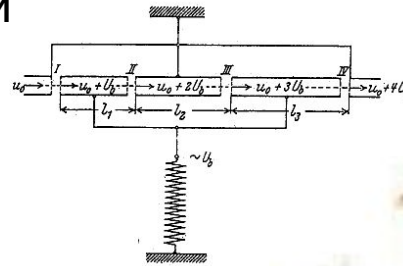
Лінійні

Швед Густав Адольф Ізінг (Gustaf Adolf Ising) -
1924 - запропонував принцип лінійного
резонансного прискорювача



Норвезький фізик Рольф Відерое (Rolf Wideröe) – 1928 – перший
демонстраційний резонансний лінійни

50 кеВ, іони натрія,
напругою 25 кВ



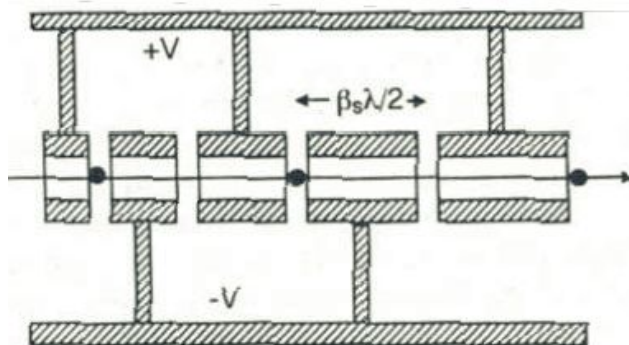
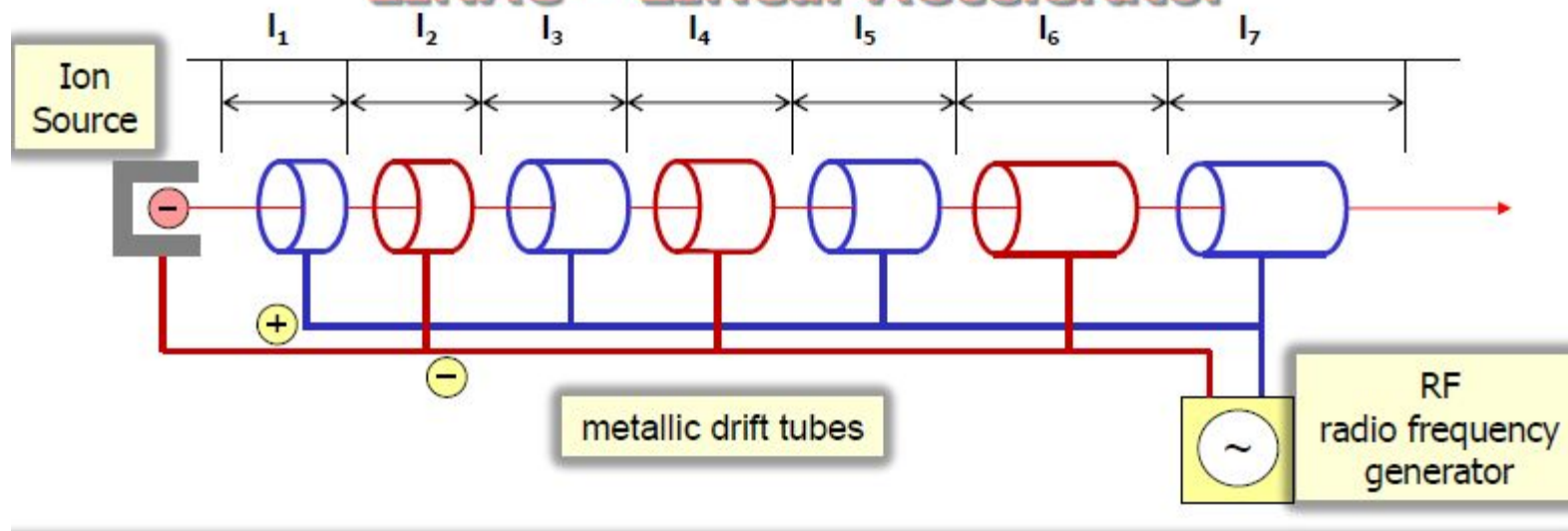
Рольф Відерое
біля одної з
моделей лінійного
резонансного
прискорювача в
музеї
Röntgen-Museum in
Remscheid



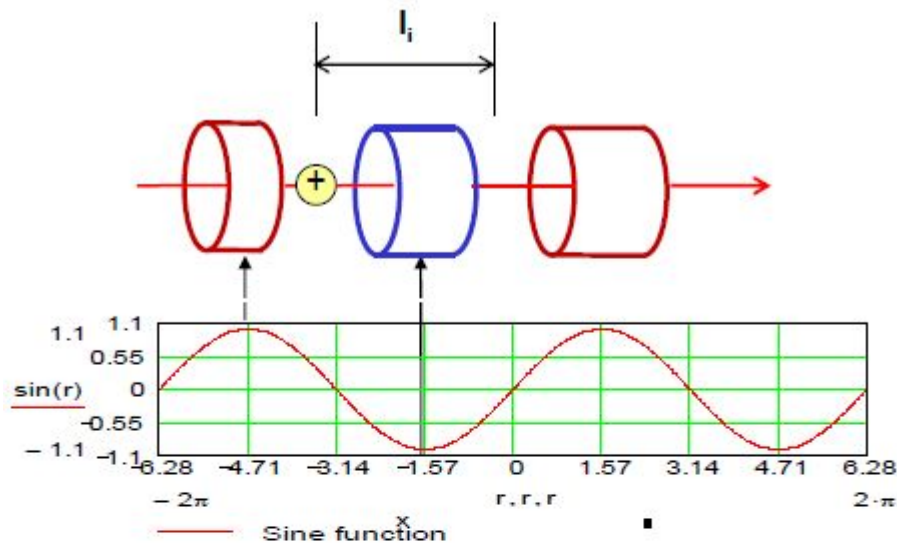
Рольф Відерое (Rolf Wideröe)
11 липня, 1902, Осло,
Норвегія
11 жовтня, 1996, Nussbaumen,
Швейцарія

Лінійний резонансний радіочастотний прискорювач (схема Відерое)

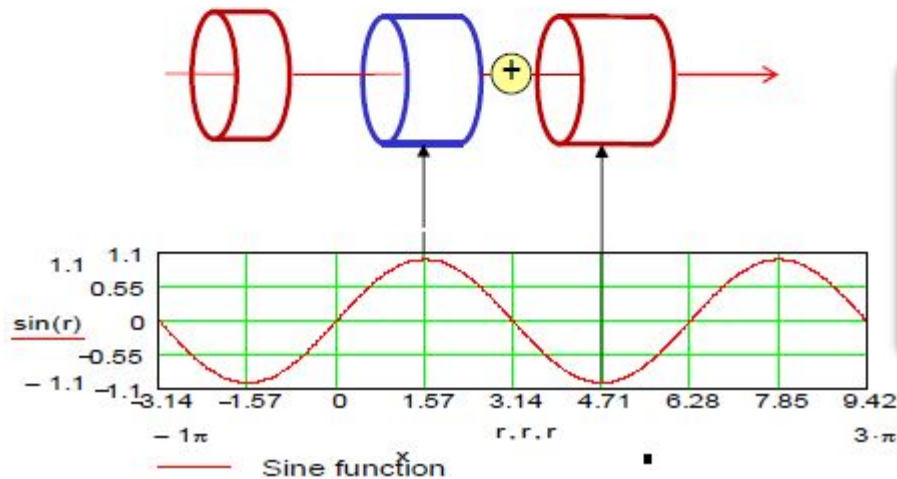
LINAC – LINear ACcelerator



Лінійний резонансний радіочастотний прискорювач

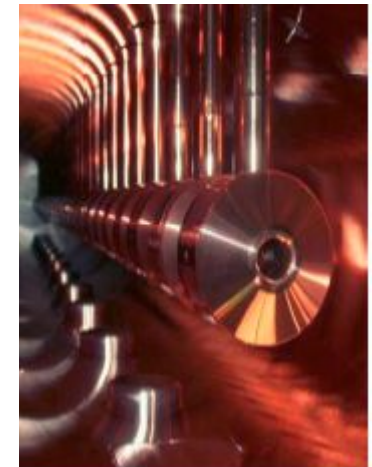
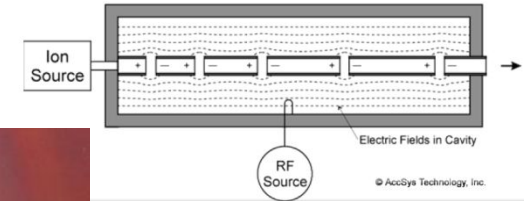
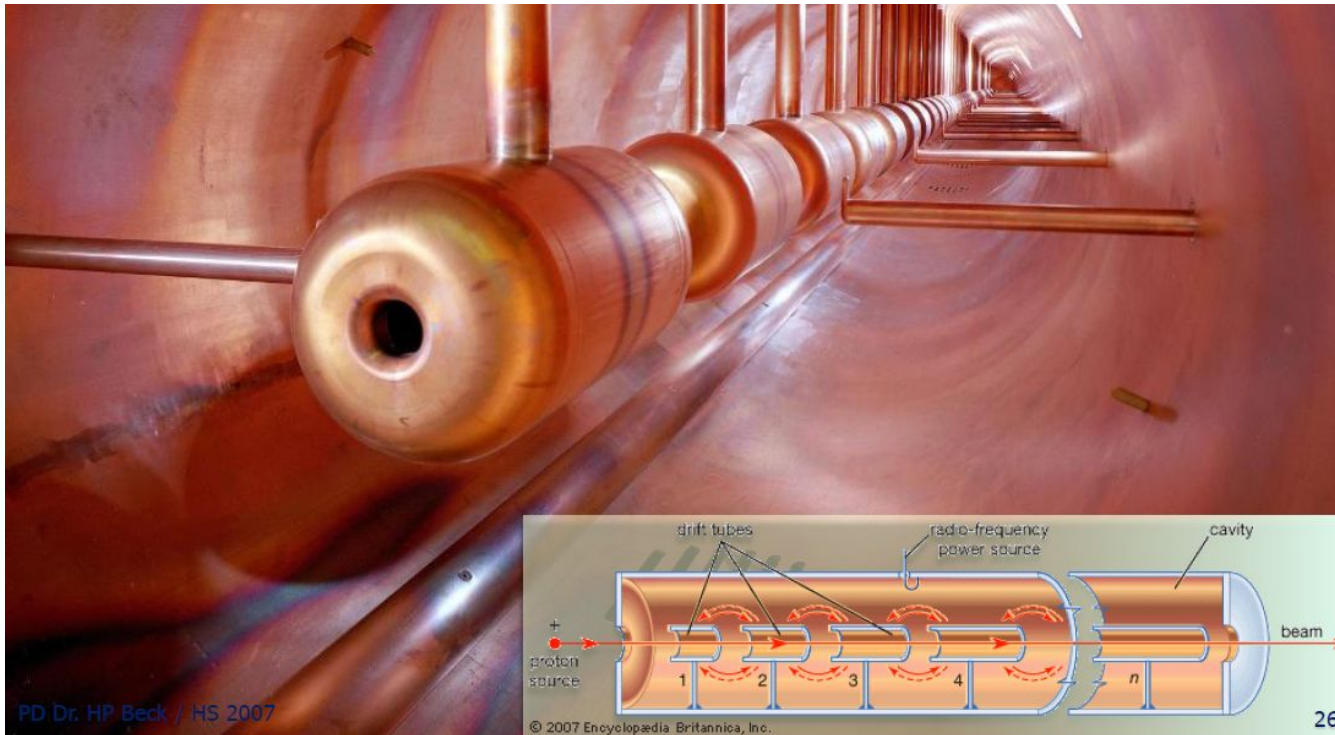


Неможливо прискорювати неперервні пучки, а тільки банчі (bunches)



Лінійний резонансний радіочастотний прискорювач (прискорювач Альвареца)

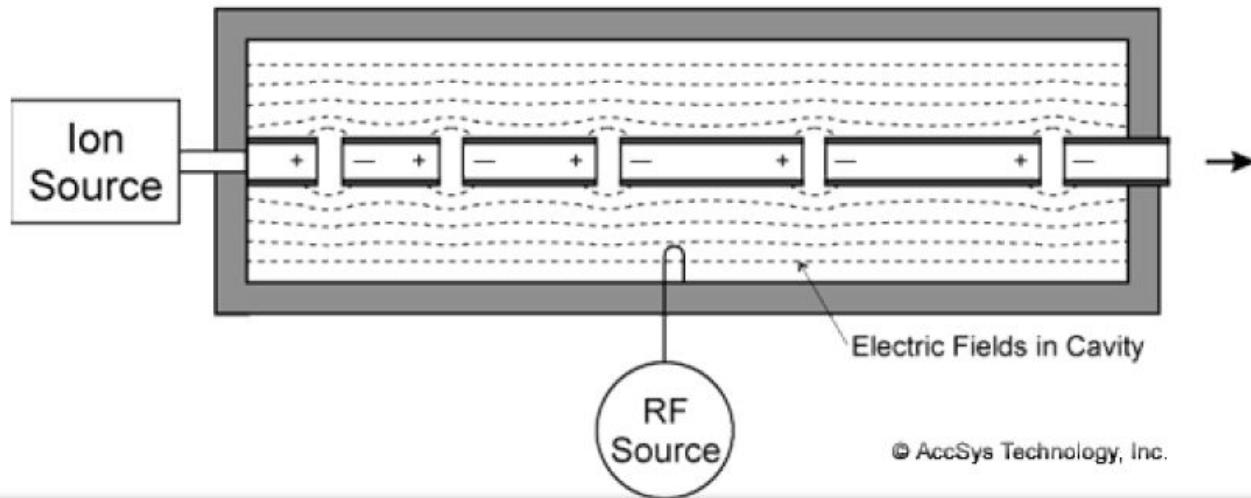
1947 - Alvarez LINAC



Більшість сучасних протонних лінійних прискорювачів - в основі схема прискорення Альвареца

Лінійний резонансний радіочастотний прискорювач (прискорювач Альвареца)

1947 - Alvarez LINAC



Luis Walter Alvarez

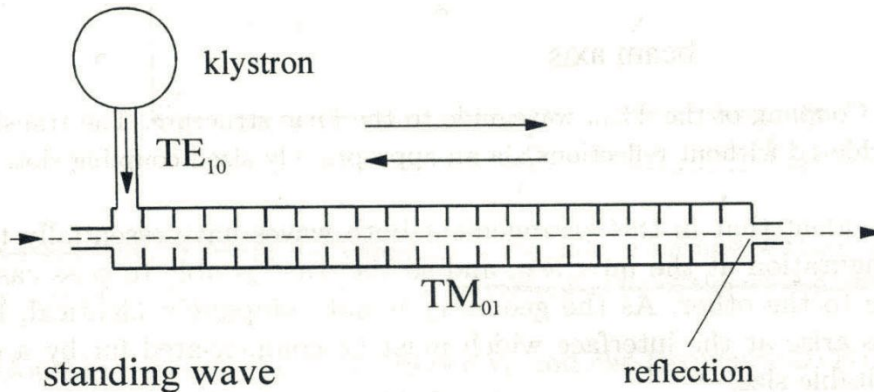
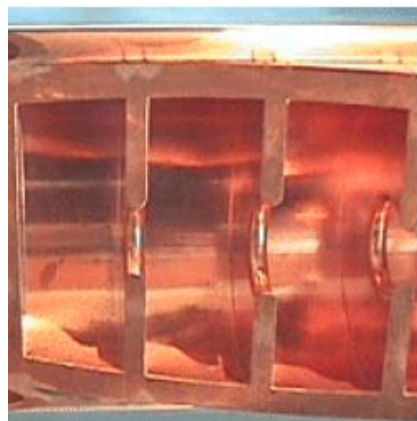
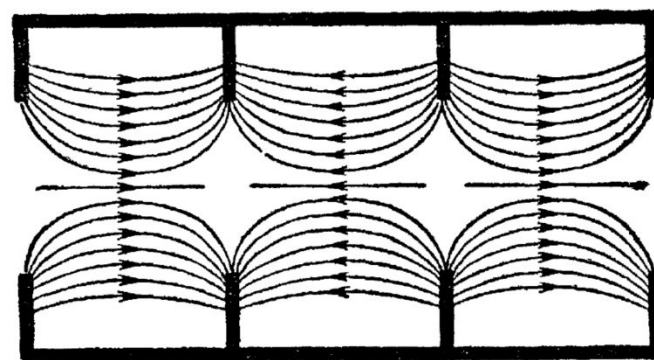
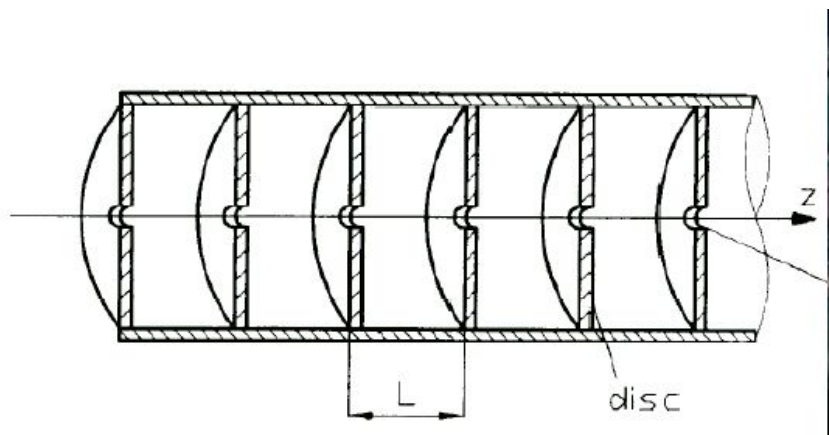
13 June, 1911, San Francisco, US

1 September, 1988, Berkeley, US

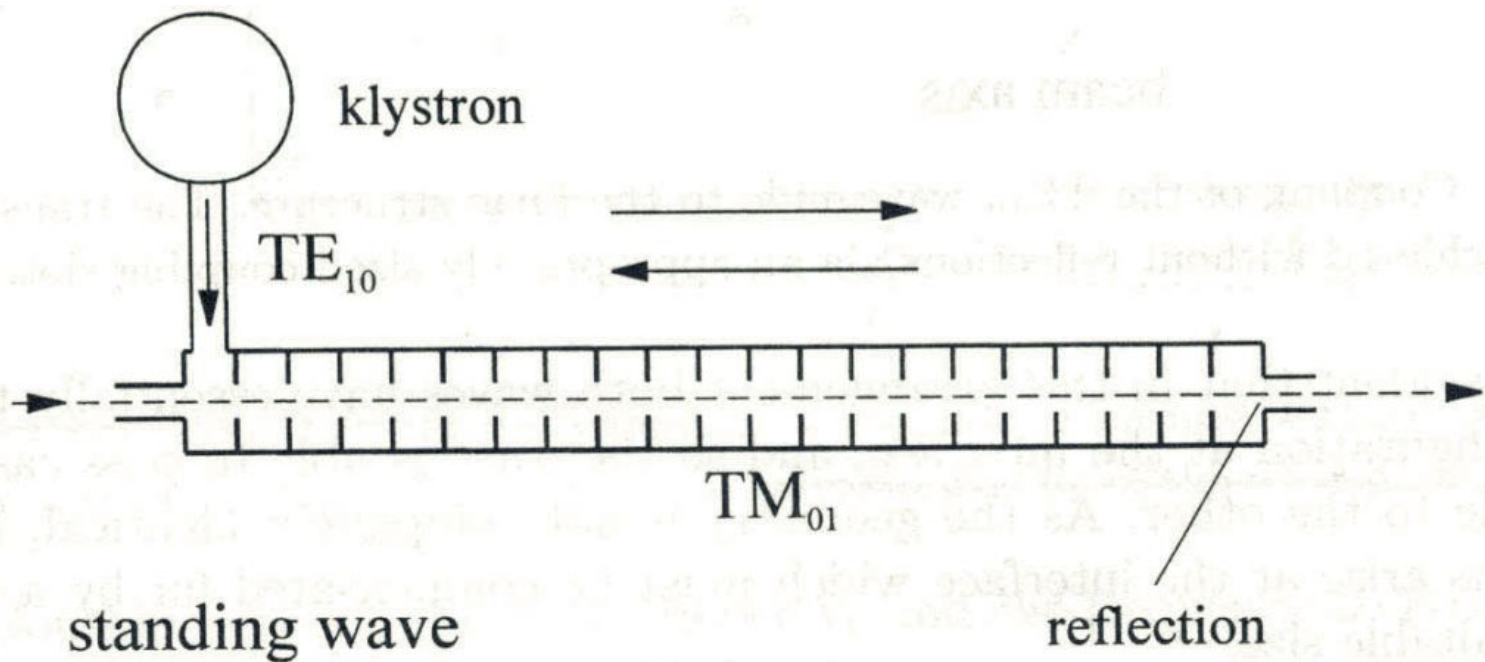
Альварец – Нобелівська премія 1968 року за внесок у фізику елементарних частинок (велика кількість резонансів, воднева бульбашкова камера, обробка даних)

Для схеми Відероу – підводи до трубок дрейфу несуть напругу, для схеми Альвареца – тільки охолодження

Лінійний резонансний радіочастотний прискорювач для електронів (Схема хвильовода з кільцевими діафрагмами – Disk-Loaded Waveguide)

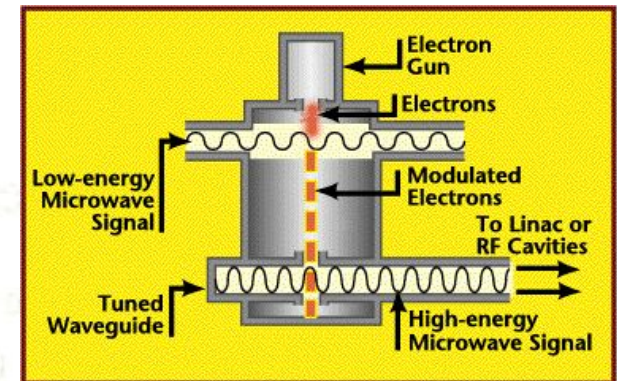
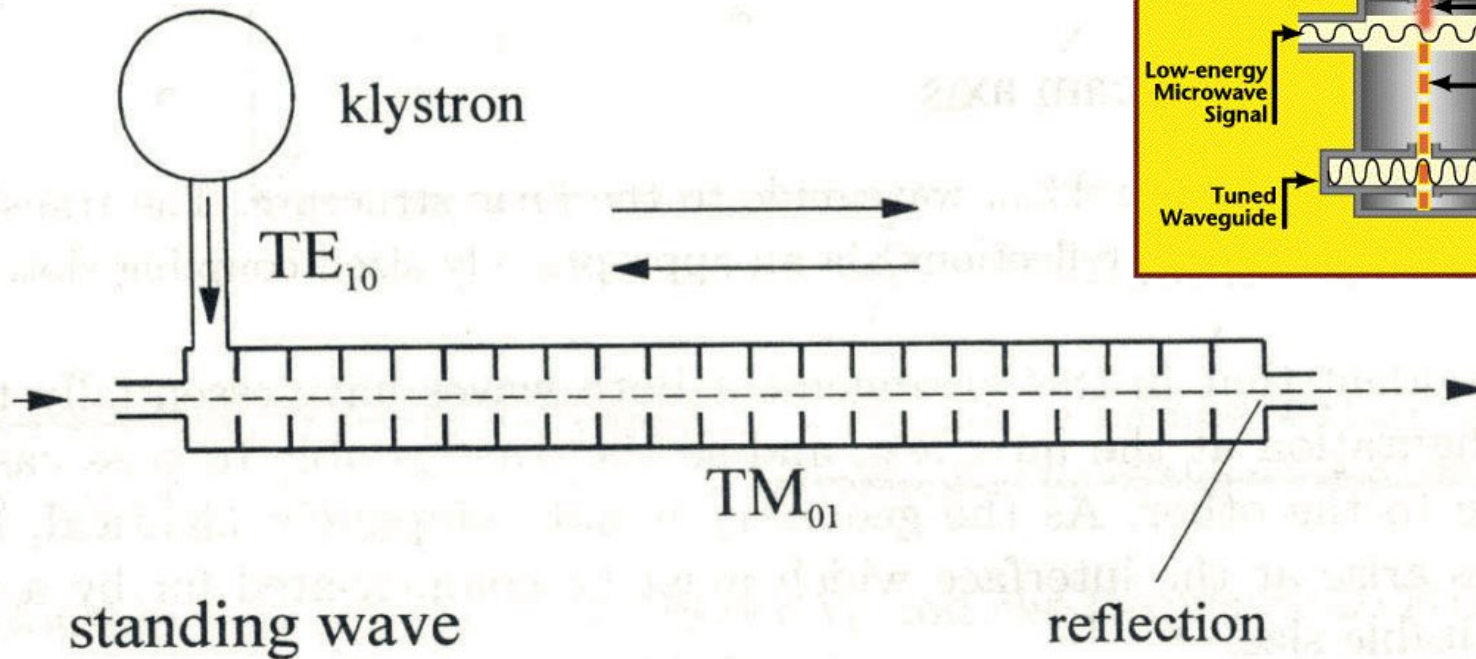


Лінійний резонансний радіочастотний прискорювач для електронів (Магнетрони -> Клістри)



Лінійний резонансний радіочастотний прискорювач для електронів (Магнетрони -> Клістри)

1939: Hansen and Varian brothers invent the klystron



Циклотрон (Лоуренс, 1932)

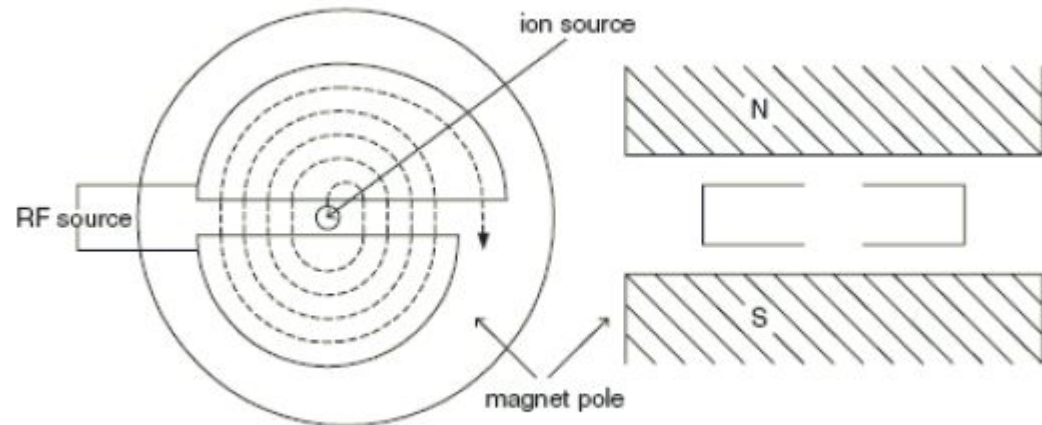
**E. O. Lawrence: Nobel
Prize, 1939**

Лоуренса надихнула ідея Відерс



The first cyclotron
4.5" diameter (1929).

First ring accelerator
1930 Ernest Lawrence
in Berkeley, USA.



2000 В □ 80 кВ

Для протонів першого циклотрону
2 січня 1930 року - зробив аспірант
Лоуренса
Лівінгстон

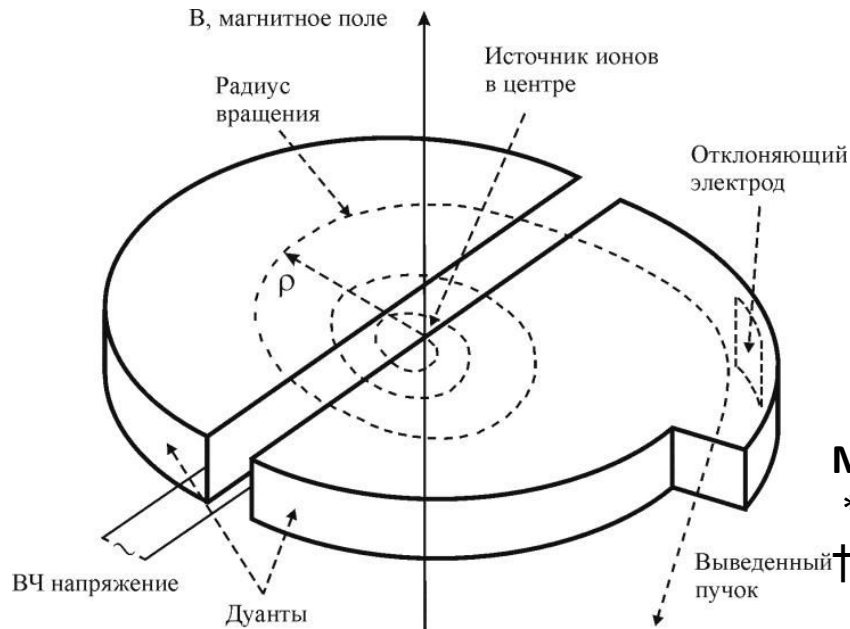
Lawrence and Livingston construct
first cyclotron (1932), accelerating
1.2 MeV protons

Циклотрон



Ernest Lawrence
* 8. August 1901
† 27. August 1958

E. O. Lawrence: Nobel Prize, 1939



Milton Stanley Livingston
* 25 May 1905
† 25 August 1986

→ "for the invention and development of the cyclotron and for results obtained with it, especially with regard to artificial radioactive elements"

Циклотрон

2000 В □ 80 кВ

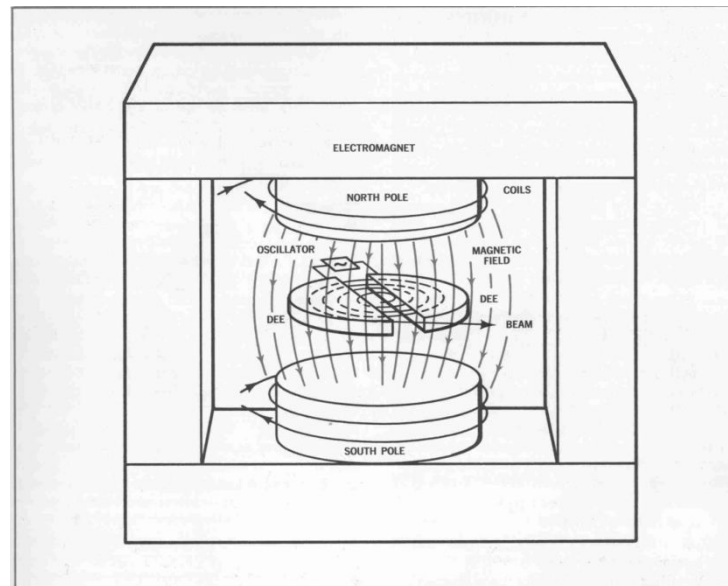
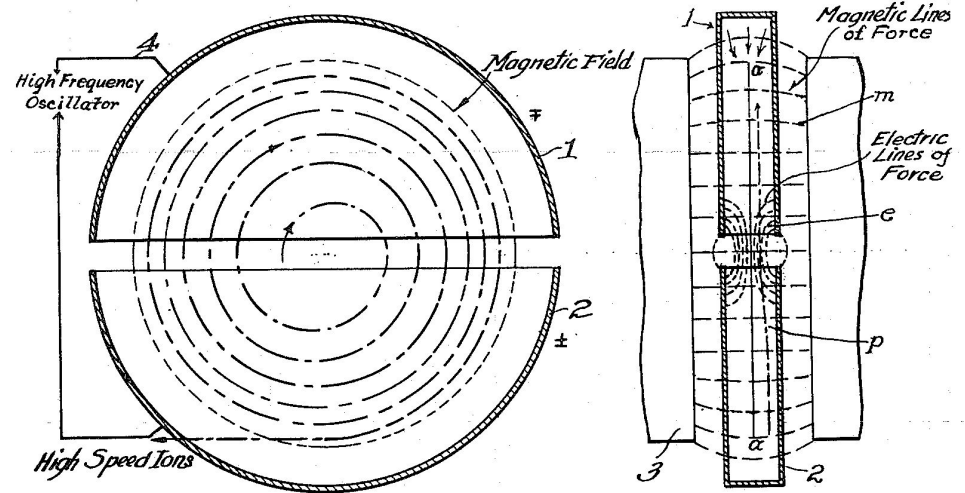
Для протонів першого циклотрону

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$T = \frac{L}{v} = 2\pi r/v$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \quad \omega = \frac{qB}{m}$$



Період не залежить від швидкості (енергії) нерелятивістської частинки

Циклотрон

Циклотрон:

- Постійне магнітне поле
- Нерелятивістські частинки

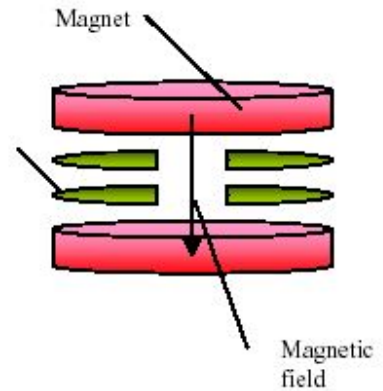
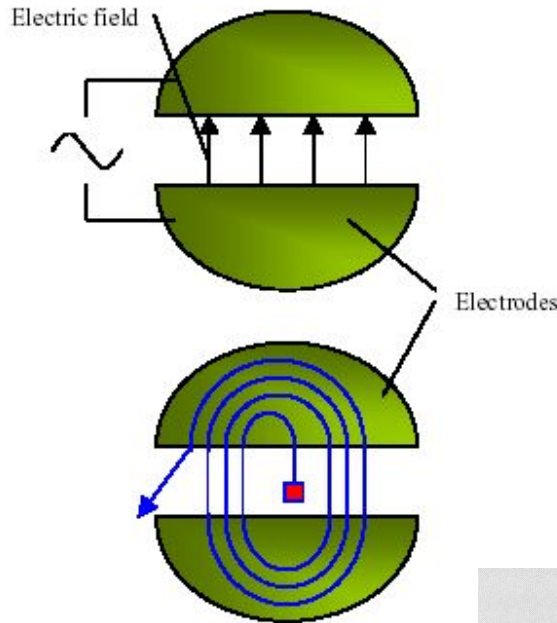
$$F = \frac{mv^2}{r}$$

$$F = qvB$$

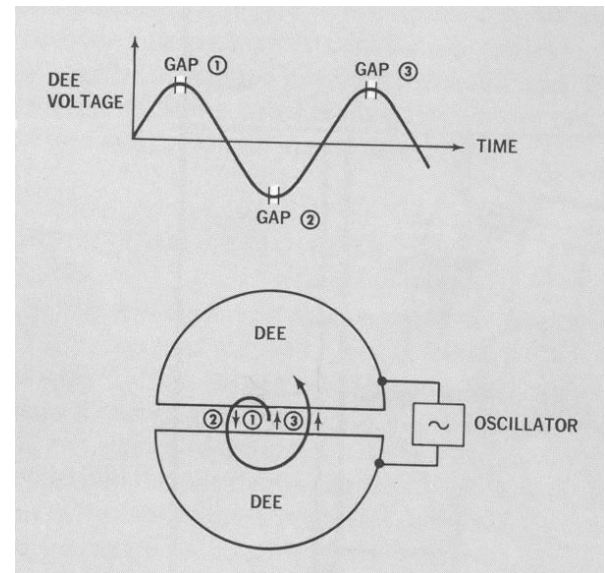
$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$v = \frac{rqB}{m}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$



$$rB = \frac{mv}{q}$$



Циклотрон

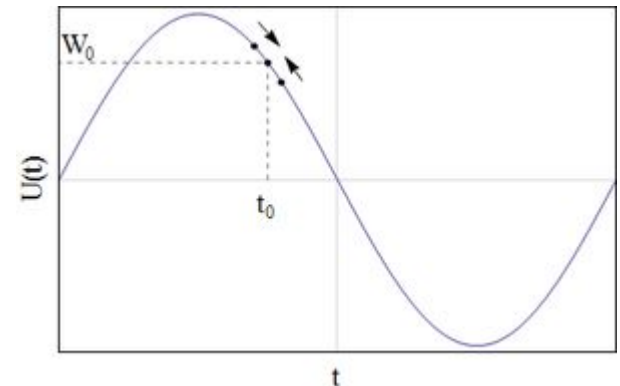
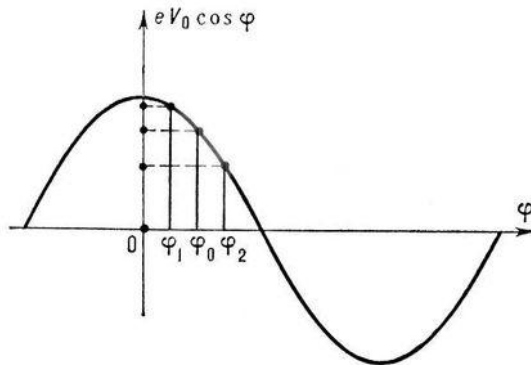
Автофазування

Принцип автофазування відкрили В.І.Векслер (1944 р.) і незалежно Е. Макміллан (1945)

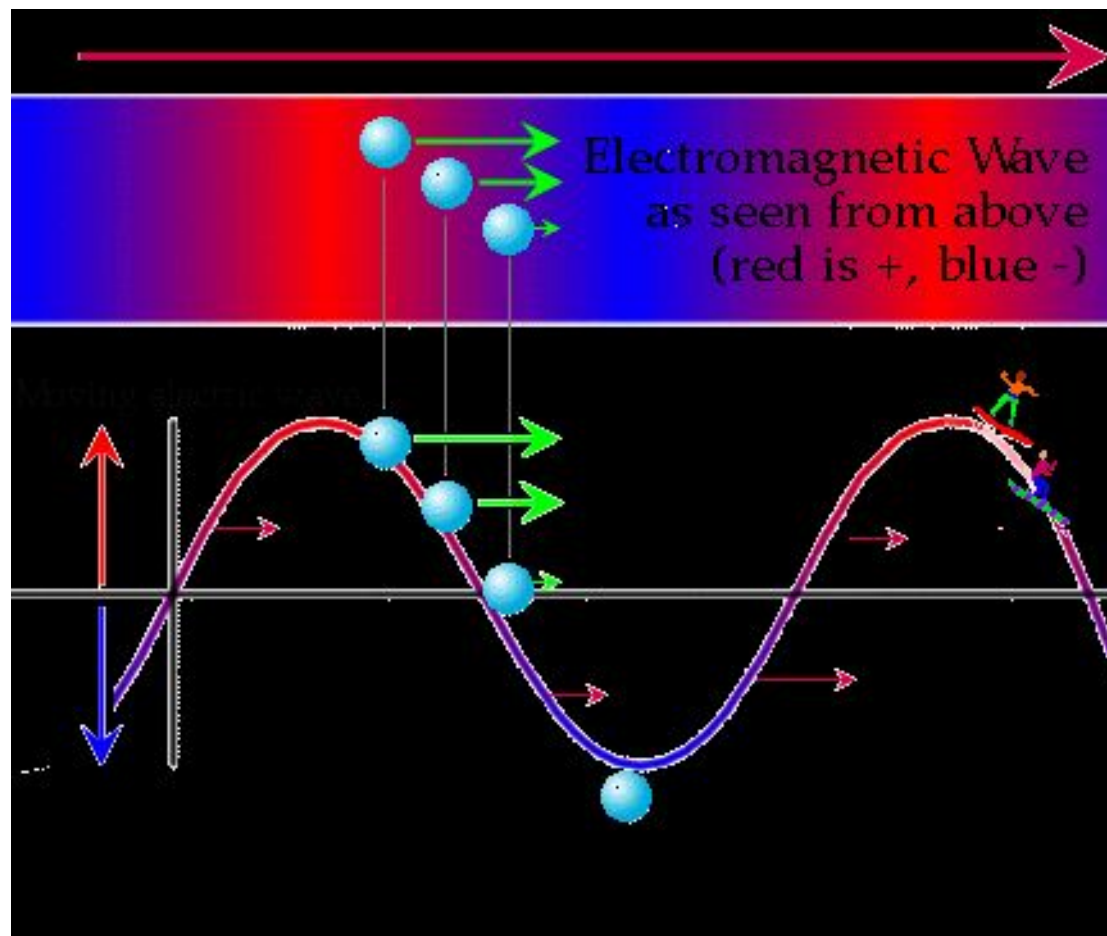
$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \quad \omega = \frac{qB}{m}$$

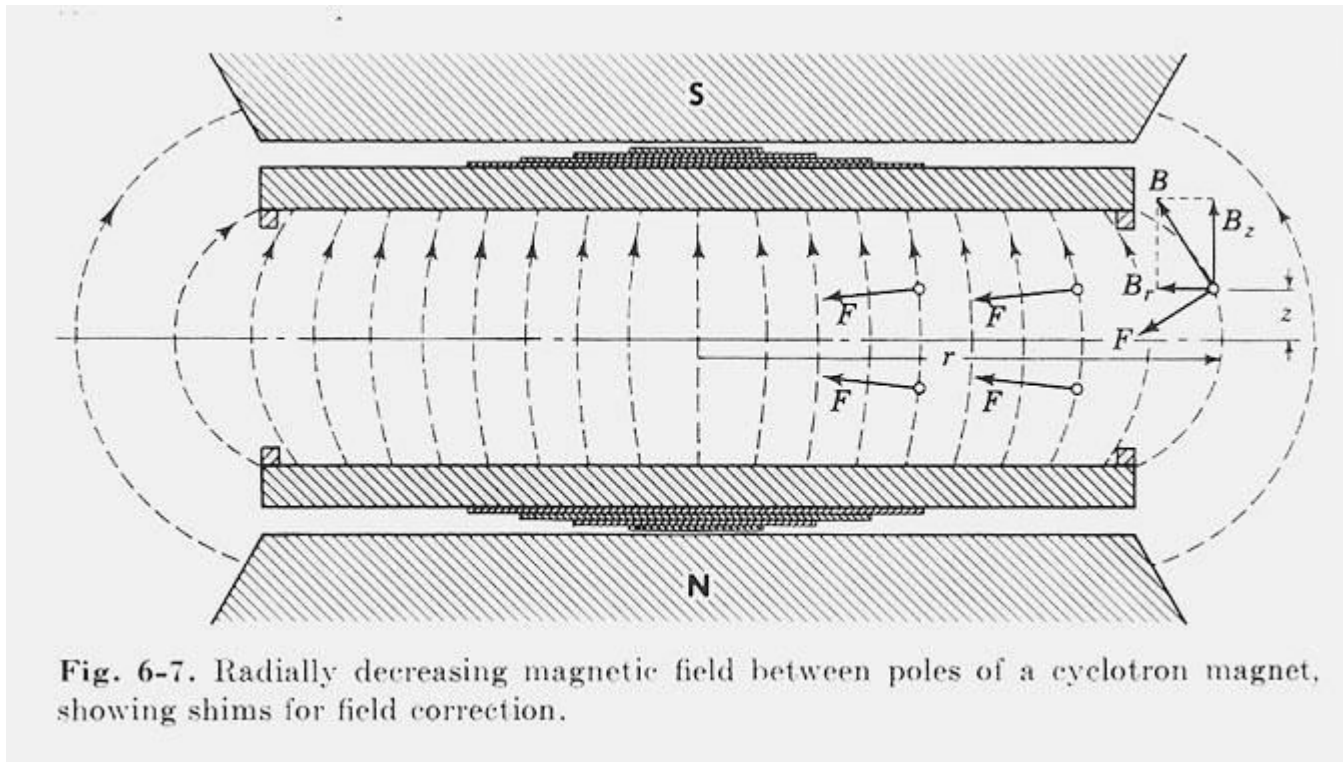
Релятивістські ефекти \square еквівалентне «збільшення» маси \square T трохи міняється



Циклотрон Автофазування



Вертикальне фокусування в циклотроні



Приклад: характеристики циклотрона для енергії протонів 20 MeV

$$B_{\text{циклотрона}} = 1 \text{ Т}$$

$$f_{\text{циклотрона}} = \frac{eB}{2\pi m} = 15.244 \text{ МГц}$$

$$E_{\text{кін}} = 20 \text{ MeV} = (\gamma - 1)mc^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right) \cdot 938.3 \text{ MeV} \Rightarrow$$

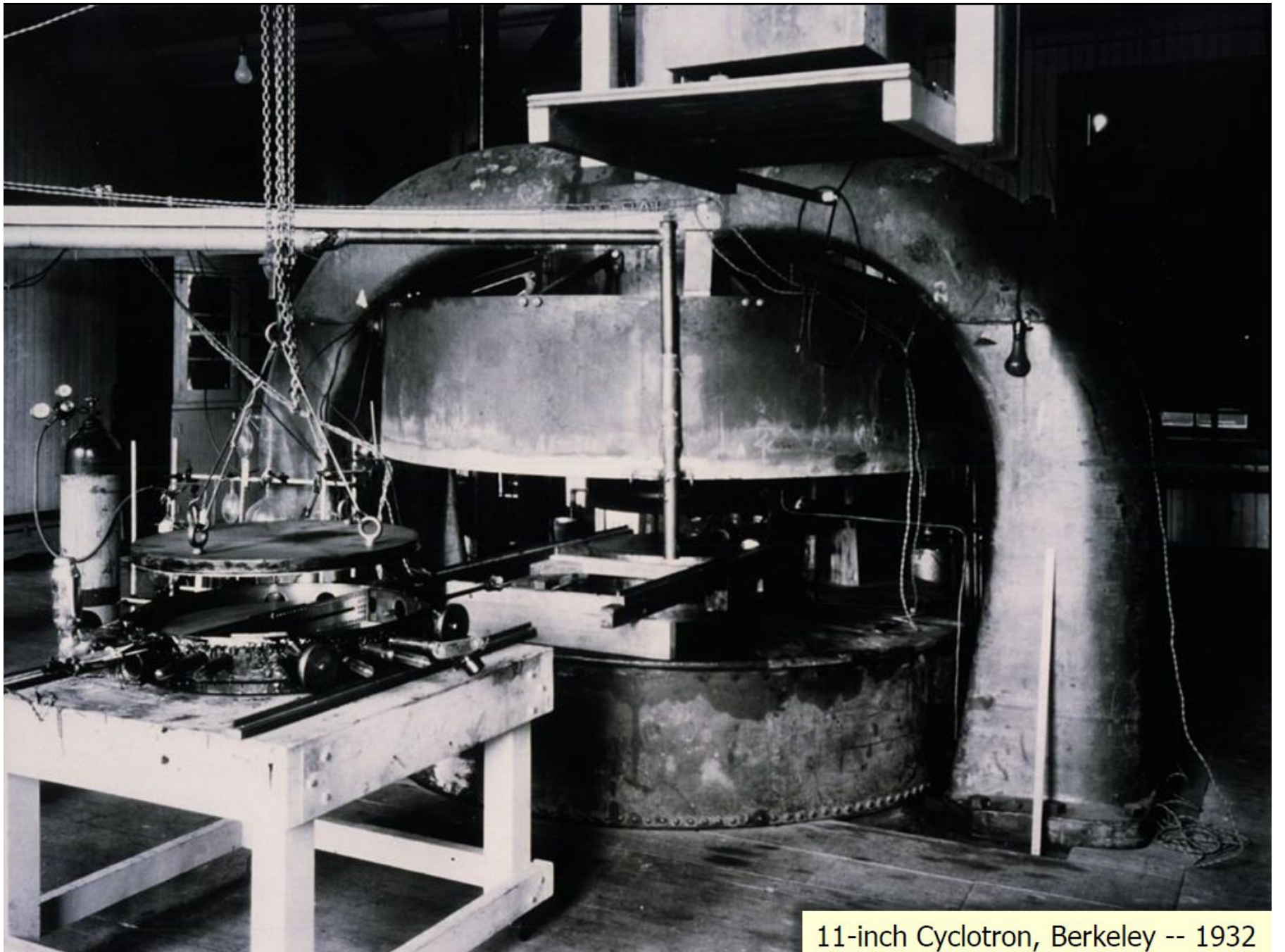
$$\beta \approx \sqrt{\frac{20}{938 + 20}} = 0.1444$$

$$v = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r \cdot f_{\text{циклотрона}} \Rightarrow$$

$$r = \frac{\beta c}{2\pi \cdot f_{\text{циклотрона}}} = 0.636 \text{ м}$$

$$\Leftarrow E_{\text{кін}} = 20 \text{ MeV}$$

$$f_{\text{циклотрона}} = 15.244 \text{ МГц}$$



11-inch Cyclotron, Berkeley -- 1932

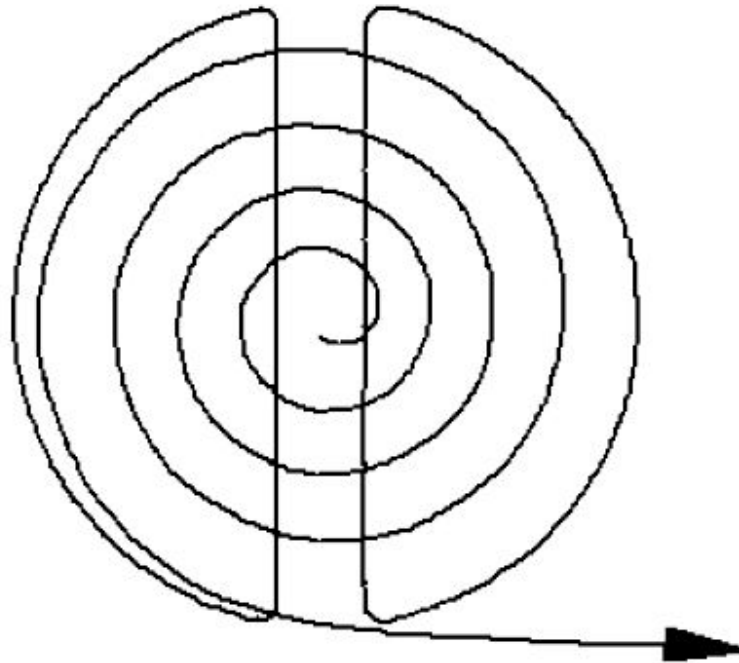


60-inch Cyclotron, Berkeley -- 1930's



184-inch Cyclotron, Berkeley -- 1940's

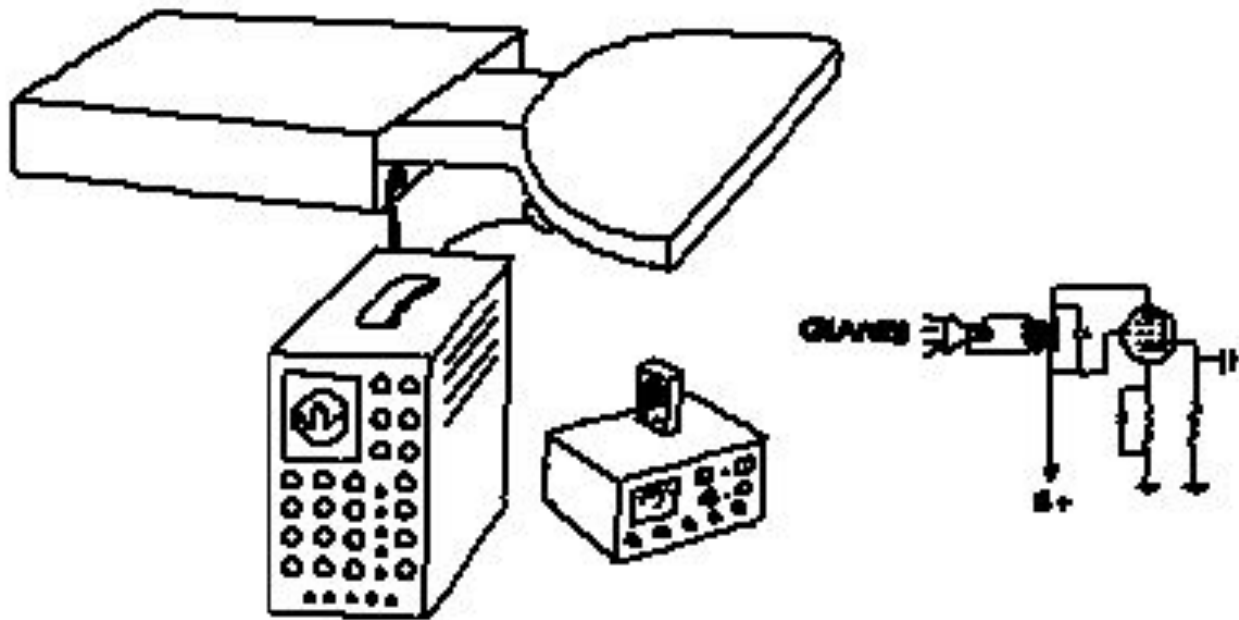
Трохи фізичного



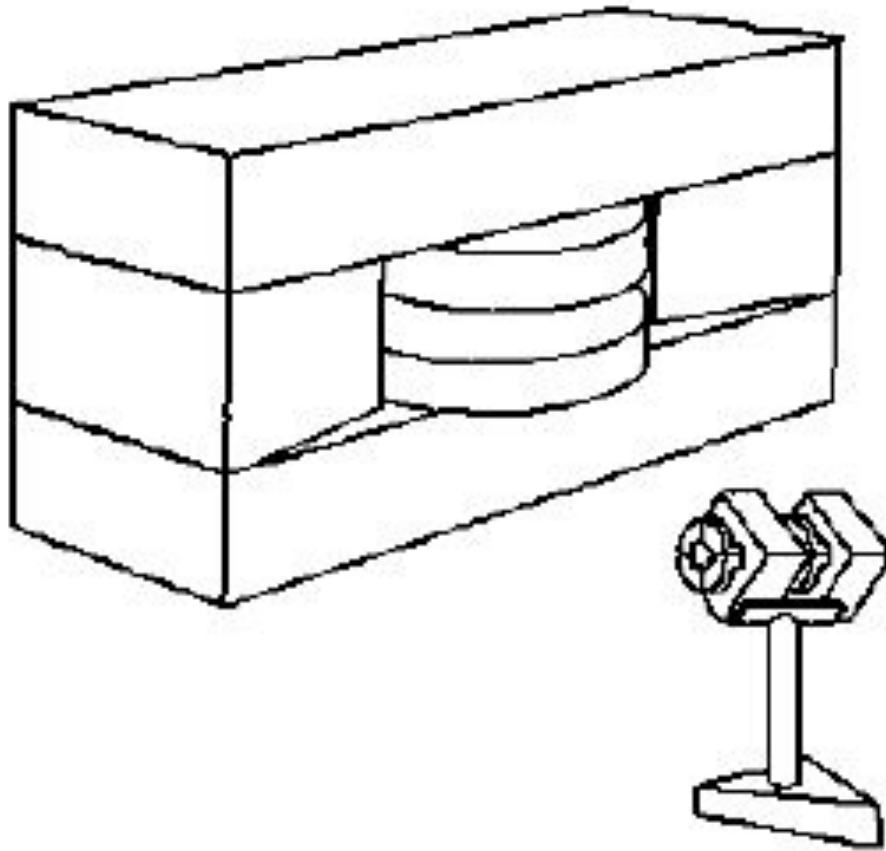
Так бачать циклотрон студенти-фізики



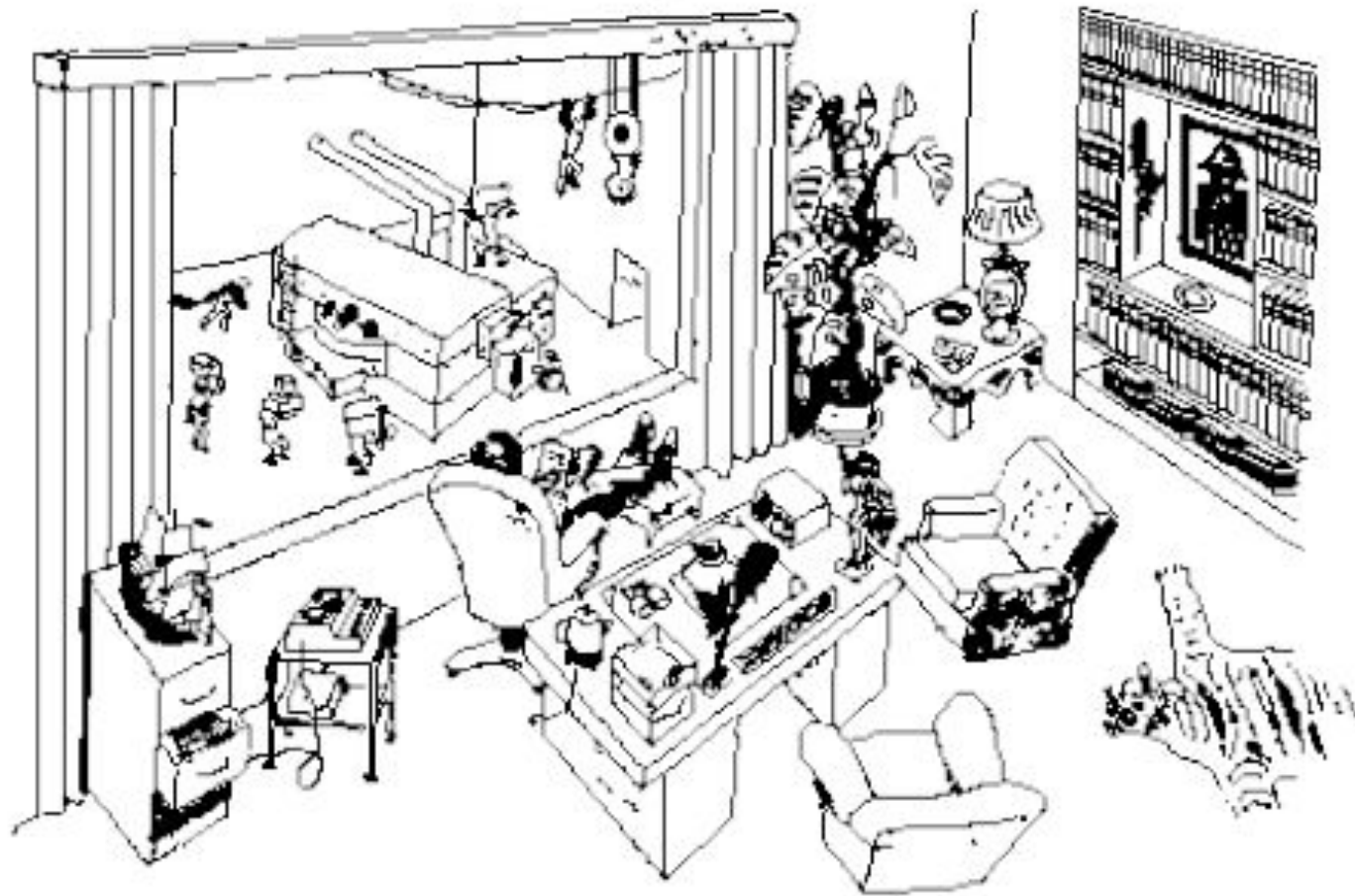
Так бачать циклотрон фізики - експериментатори в ФВЕ



Так бачать циклотрон інженери-радіоелектронщики



Так бачать циклотрон інженери-механіки



А так бачить циклотрон
директор

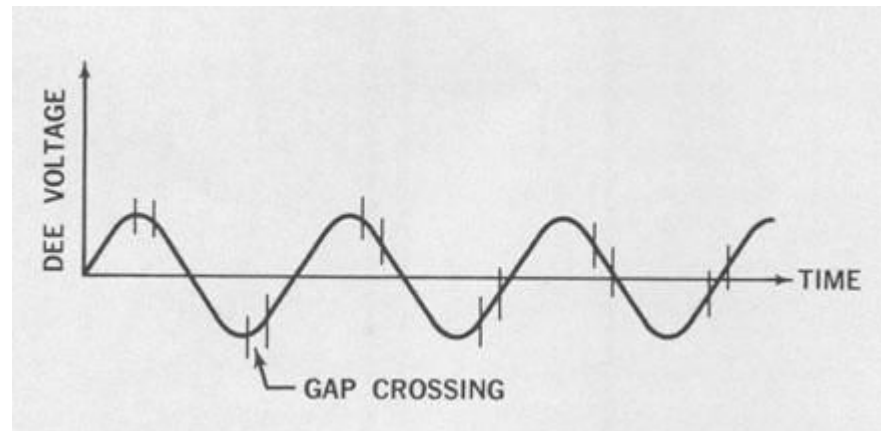
Релятивістське обмеження

Лоуренс побудував серію циклотронів в 30-х роках 20 сторіччя – найбільший з них 60-дюймовий Crocker Cyclotron в 1939 році. Він прискорював електрони до енергій 12 MeV та альфа частинки до 48 MeV

$$f_{\text{циклотрона}} = \frac{1}{\gamma} \frac{eB}{2\pi m}$$

$$v = 16\% \cdot c$$

На 1% частота менша => за 25 циклів затримка на 25% => зсув в зону гальмування



Тому для електронів – циклотрон не ефективний (мала енергія спокою)

Ізохронний циклотрон

$$f_{\text{циклотрона}} = \frac{1}{\gamma} \frac{eB}{2\pi m}$$

$$r = \frac{\gamma m_0 v}{qB} \quad B = \gamma B_0 \quad r = \frac{m_0 v}{qB_0}$$

Магнітне поле збільшують в середньому з радіусом при збільшенні релятивістської енергії, при цьому для ефективного фокусування використовують складний закон поведінки магнітного поля по радіусу і по азимуту

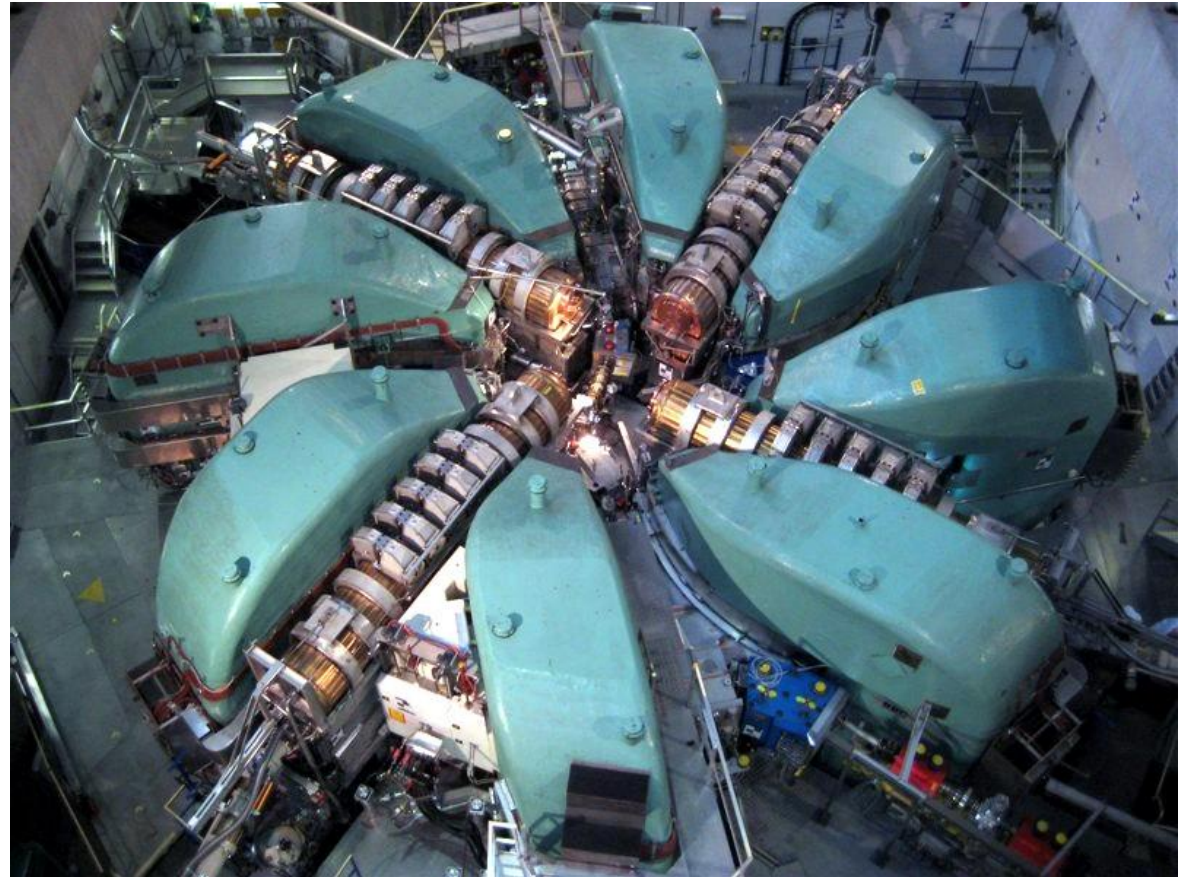
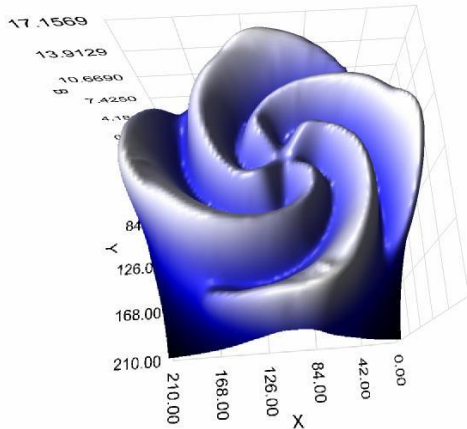
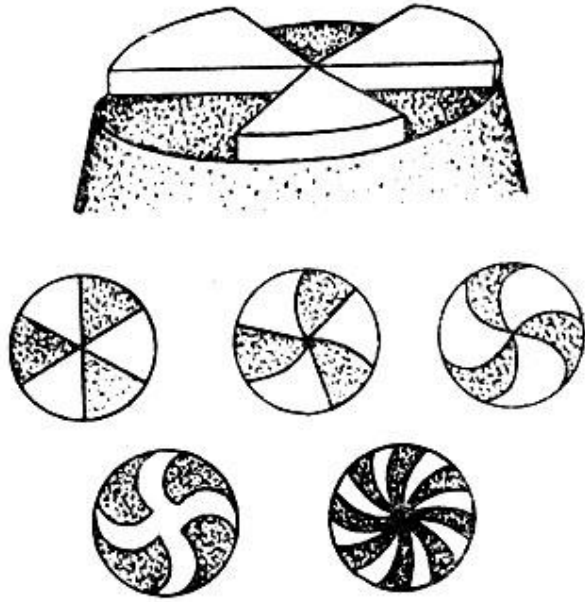
Одним із способів підвищення максимально енергії циклотрона є знаходження такої модифікації циклотрона, в якій період обертання частинки не залежить від її енергії. Якщо додатково зажадати при цьому сталості частоти прискорює напруги, то азимутально-симетричне магнітне поле має зростати з рад

$$B(r) = \frac{B(0)}{\sqrt{1 - (r/r_c)^2}}$$

Але при такій поведінці поля не буде вертикального фокусування – для його забезпечення вводять азимутальну залежність поля.

Вперше запропонував Американський вчений Томас. У 1938 році він показав, що при певній конфігурації магнітного поля орбіти заряджених частинок виявляються стійкими і ізохронними. Але популярною така схема циклотронів стала тільки у наші дні

Ізохронний циклотрон



Енергії протонів досягають порядку сотень MeV

Фазотрон (синхроциклотрон)

$$f = \frac{f_0}{\gamma} = f_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

$$f_{\text{циклотрона}} = \frac{1}{\gamma} \frac{eV}{2\pi t}$$



Перший прискорювач в CERN –
Синхроциклотрон, 600 MeV,
1957



Надпровідний синхроциклотрон
(TriNiobium Core™, Mevion)- 250
MeV, діаметр 1.8 м. Для
протонної терапії

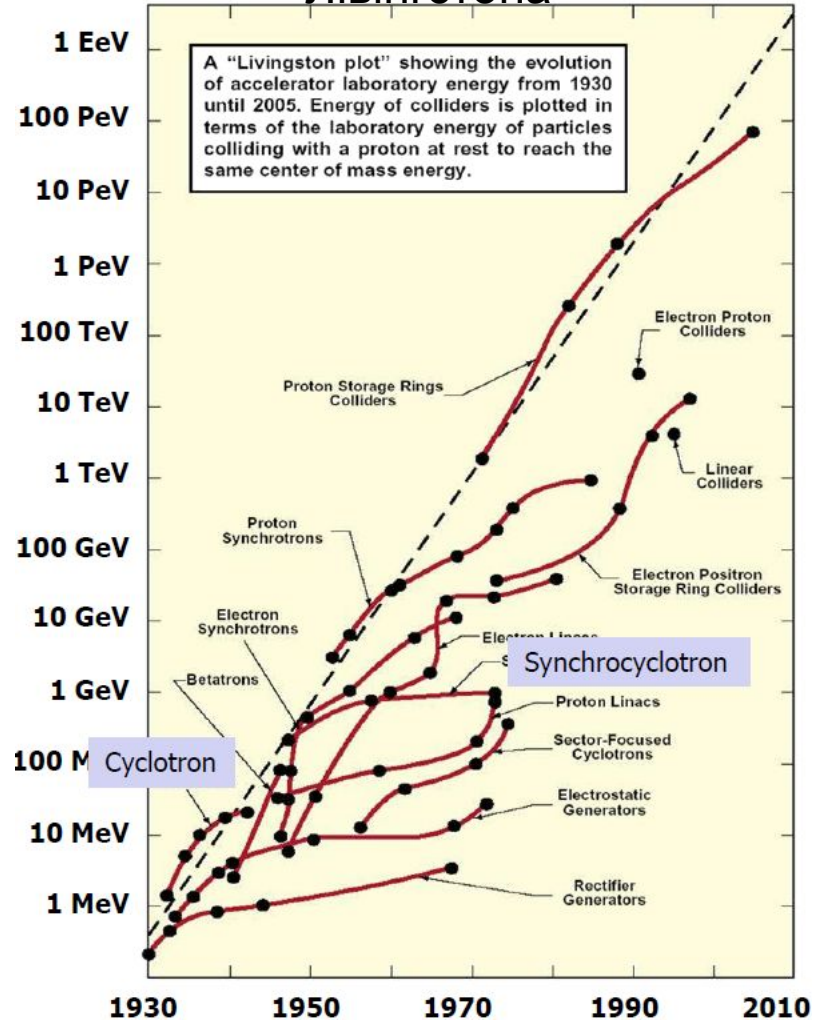
Енергії протонів досягають порядку сотень
MeV

Синхроциклотрон (фазотрон)

Графік
Лівінгстона

$$f_{\text{циклотрона}} = \frac{1}{\gamma} \frac{eV}{2\pi t}$$

$f_{\text{циклотрона}}$ зменшують при збільшенні релятивістської енергії



Синхронізм при прискоренні

Прості теоретичні розрахунки приводили до кількості частинок, які попадали в режим прискорення із зміною частоти, яка прямувала до нуля.

Групування частинок в банч для прискорення забезпечується **принципом автофазування**, яке відкрили

Радянський вчений В.І. Векслер в 1944 році
і незалежно

Американський вчений Е.Макмілліан у 1945 році

Синхронізм при прискоренні

Ідея принципу автофазування полягає в тому, що для компенсації збільшення періоду обертання частинок, що веде до порушення синхронізму, змінюють

або частоту прискорюючої електричного поля,
або індукцію магнітного поля,
або те й інше.

Принцип автофазування використовується в:

- Ізохронному циклотроні
- Фазотроні (синхроциклотроні),
- Синхротроні,
- синхрофазотроні.

Синхротрон

Синхротрон - один з типів резонансних циклічних прискорювачів. Характеризується тим, що **в процесі прискорення частинок орбіта пучка залишається постійного радіуса, а магнітне поле поворотних магнітів на цьому радіусі зростає.**

Крім того, залишається постійною частота прискорюючого електричного поля (для електронів $v=c$)

$$f = \frac{1}{\gamma} \frac{eV}{2\pi m_0}$$

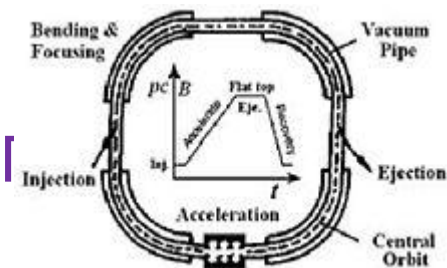
$$r = \frac{mv}{qB}$$

Перший синхротрон (електронний) побудовано в США

(Edwin McMillan) – 1944 рік

LEP – більше 100 GeV

Енергії електронних синхротронів – до сотень Г



Синхротрон (Синхротронне випромінювання)

$$\Delta W \sim a^2.$$

Втрати енергії на радіаційне випромінювання за один оберт

$$\Delta W = \frac{4\pi}{3} \frac{e^2}{R} \left(\frac{E}{m_e c^2} \right)^4 \quad \Delta W \text{ [кэВ/об.]} = 90 \frac{E^4 \text{ [ГэВ]}}{R \text{ [м]}}$$

E – повна енергія

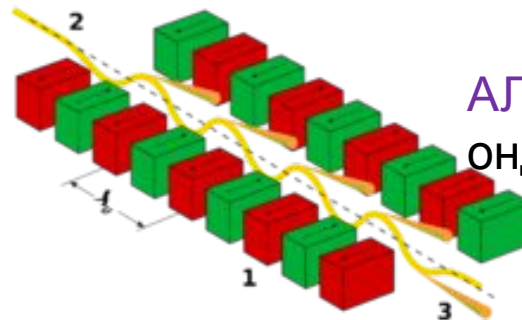
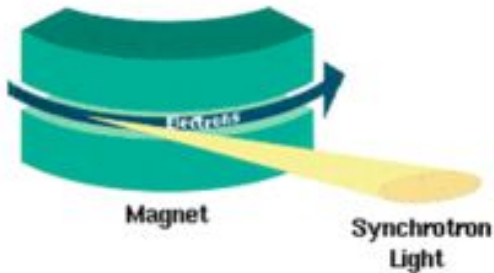
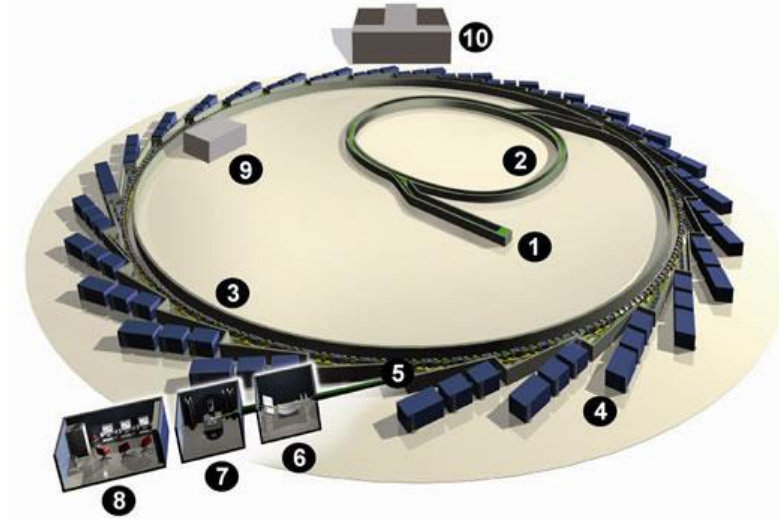
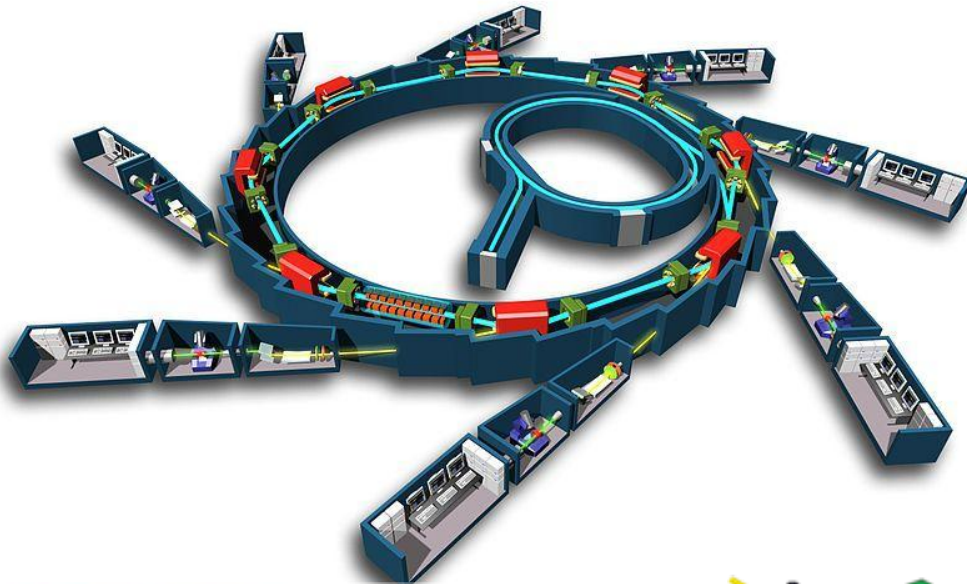
$$\Delta W \sim \frac{1}{m_e^4}$$

□ Актуально тільки для електронів

Синхротрон (Синхротронне випромінювання)



Soliel, Saclay (Paris)



АЛЬТЕРНАТИВА -
ондулятори

Синхрофазотрон (Протонний синхротрон зі слабким

Синхрофазотрон – головний тип сучасних резонансних циклічних прискорювачів. Характеризується тим, що **в процесі прискорення частинок орбіта пучка залишається постійного радіуса, а магнітне поле поворотних магнітів на цьому радіусі зростає.**

Крім того, змінюється частота прискорюючого електричного поля (для важких частинок - протонів, ядер)

$$f = \frac{1}{\gamma} \frac{eV}{2\pi m_0}$$

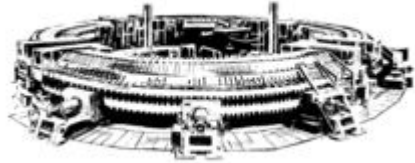
$$r = \frac{mv}{qB}$$

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e96/PAPERS/ORALS/FRX04A.PDF>

Перший в світі – Космотрон, США, БНЛ, 1952, 3 ГеВ,
Бермінгемський протонний синхротрон (1953 р., Марк Оліфант, 1 ГеВ)

Синхрофазотрон ОІЯЛ – 1957 р. 10 ГеВ (в 2002 році зупинено)

Історія великих прискорювачів

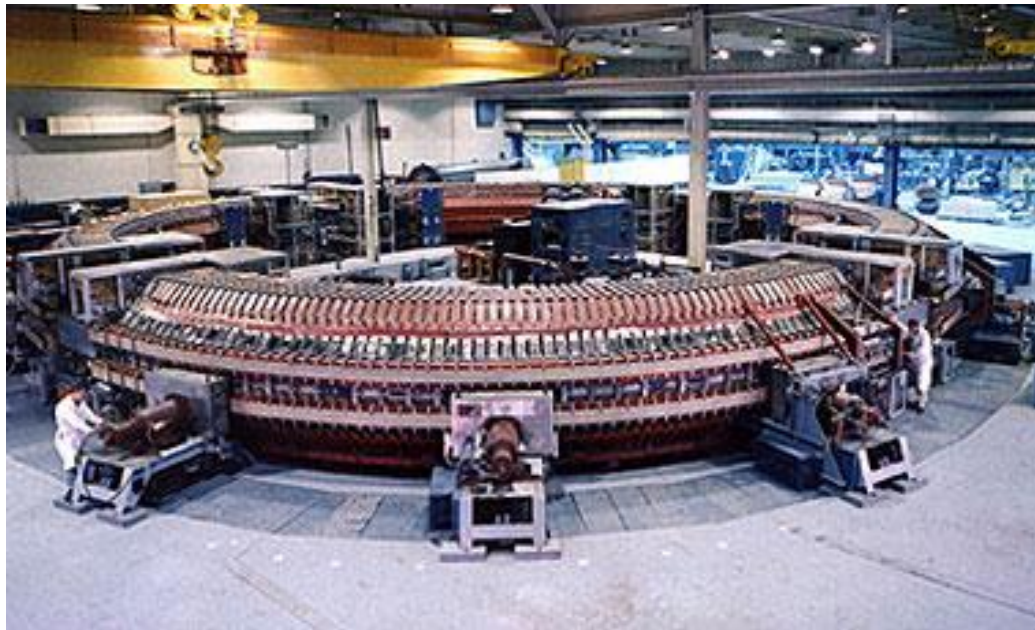


Cosmotron

**Протонний синхротрон із слабким фокусуванням,
BNL (Brookhaven National Laboratory), USA**

1952 (1953, повна енергія) – 1966 (1969, демонтований), 3.3 ГеВ

Вперше продукувалися – усі типи мезонів, які були відомі з дослідження космічних променів, K₀L мезони, перші векторні мезони



BNL (Brookhaven National Laboratory), USA

The image is a screenshot of the Google Maps interface. At the top left is the Google logo. Below it are search and navigation controls. The main map area shows a route from New York City (marked 'A') to Brookhaven National Laboratory (marked 'B'). The route is highlighted in purple and follows major roads like I-495 and I-195. The map includes various geographical features, city names, and road numbers. On the right side, there are buttons for 'Супутник' (Satellite) and 'Трафік' (Traffic). At the bottom, there is a copyright notice: 'Дані карт ©2013 Google - Редагувати в Картографі Google Повідомити про помилку'.

Google

Прокласти маршрут Мої місця

Нью-Йорк, Сполучені Штати Америки

Brookhaven National Laboratory, Center Street

Додати пункт призначення - Показати параметри

ПРОКЛАСТИ МАРШРУТ

Запропоновані маршрути

I-495 E 67,2 миль, 1 година 18 хвилин
• 3 урахуванням заторів: 1 година 28 хвилин

Маршрут автомобілем до Brookhaven National Laboratory

На цьому маршруті трапляються дороги обмеженого користування або приватні дороги.

Нью-Йорк

1. Вирушайте на південний захід по Broadway у напрямку до Chambers St
2. На 1 повороті поверніть ліворуч на Chambers St
3. Поверніть праворуч на Centre St

Дані карт ©2013 Google - Редагувати в Картографі Google Повідомити про помилку

RHIC

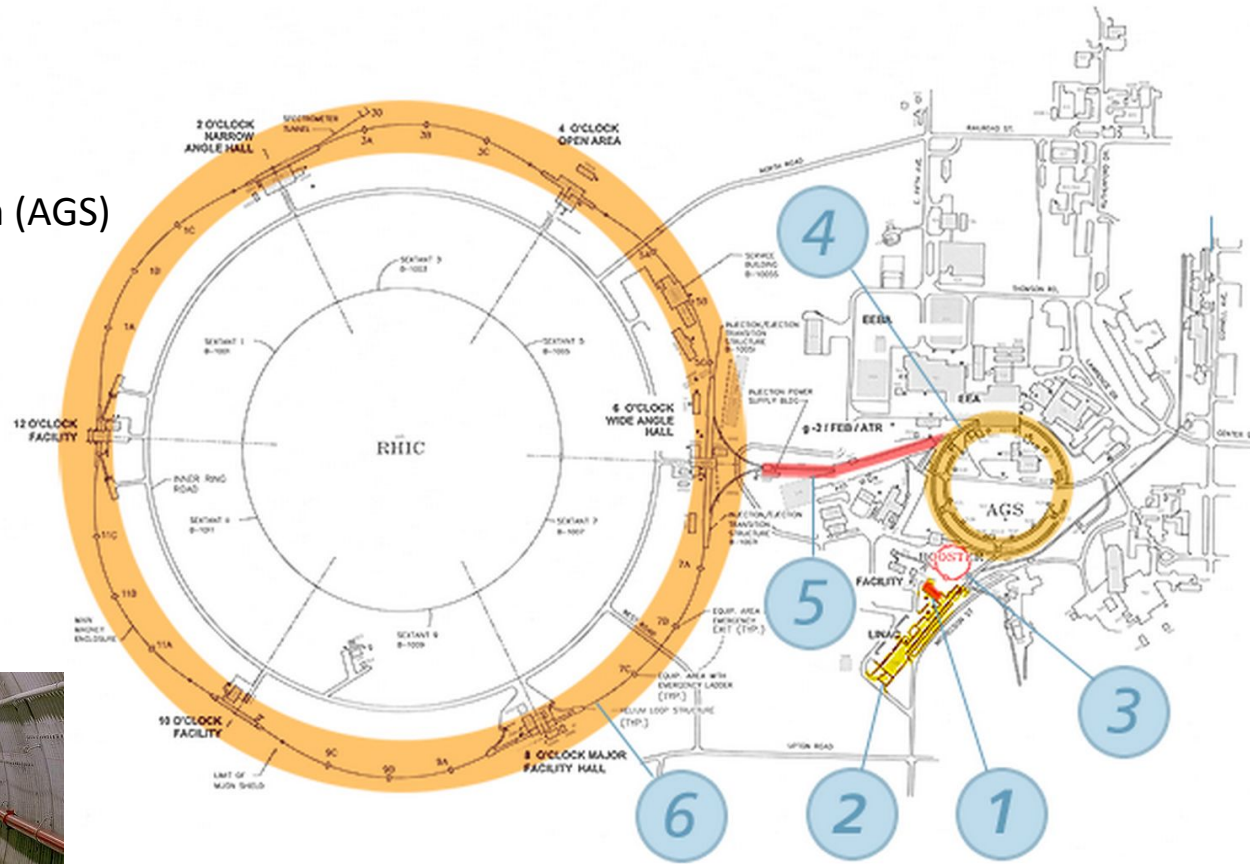
(Relativistic Heavy Ion Collider)

BNL (Brookhaven National Laboratory), USA

Коллайдер з накопичувальними кільцями, які перетинаються, прискорює протони і важкі іони, довжина кілець 3834 метри, надпровідні магніти (диполі 3.45 T)

- 1 -- Electron Beam Ion Source (EBIS)
- 2 -- Linac
- 3 -- Booster
- 4 -- Alternating Gradient Synchrotron (AGS)
- 5 -- Beamline
- 6 -- two rings of RHIC

Au+Au – 200 GeV на нуклонну пару в системі центру мас



Історія великих прискорювачів

Bevatron

**Протонний синхротрон із слабким фокусуванням,
LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory), USA, Каліфорнія**

1954 – 1971, 6 GeV

1971-1993 – як бустер важких іонів

для лінійного прискорювача

SuperHILAC (Super Heavy Ion Linear Accelerator),

Bevatron+SuperHILAC=Bevalac

2009-2011 - демонтаж

Вперше зареєстровані антипротони в 1955 році – Нобелівська премія (Еміліо Сегре та Оуен Чемберлен, 1959 р.) , використовувалися бульбашкові камери з рідкого водню (Луїс Альварес, Нобелівська премія 1968 р., за відкриття резонансів з використанням бульбашкової камери)



LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory), USA, Каліфорнія Berkeley Lab

The image is a screenshot of the Google Maps interface. At the top left is the Google logo. Below it, there are navigation controls including a search bar, a 'Увійти' (Sign in) button, and a 'Прокласти маршрут' (Get directions) button. The main map area shows a route from San Francisco, CA (point A) to Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley (point B). The route is highlighted in purple and blue, passing through Oakland and Emeryville. The map includes various geographical features like the Golden Gate, San Francisco Bay, and several parks. On the left side, there is a sidebar with the following information:

- Start point: San Francisco, CA, United States
- End point: Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA
- Proposed route: I-80 E, 14.4 miles, 27 minutes (with 28 minutes of traffic).
- Route description: "Маршрут автомобілем до Національна лабораторія ім. Лоуренса в Берклі" (Route by car to Lawrence National Laboratory in Berkeley).
- Step 1: "1. Вирушайте на південний захід по Market St" (0.2 miles).
- Step 2: "2. Плавню поверніть праворуч на Haight St" (0.1 miles).
- Step 3: "3. На 3 повороті поверніть ліворуч на Octavia Blvd" (436 feet).
- Step 4: "4. Продовжуйте рух по Central Fwy" (436 feet).

At the bottom of the map, there is a scale bar showing 2 miles and 5 kilometers, and a copyright notice: "Дані карт ©2013 Google - Редагувати в Картографі Google - Повідомити про помилку".

Історія великих
прискорювачів

Станфордський лінійний прискорювач

Радіочастотний лінійний прискорювач електронів, SLAC (SLAC National Accelerator Laboratory (з 2008 р.), стара назва - Stanford Linear Accelerator Center), USA

1966 (22 GeV повна енергія) – ...,

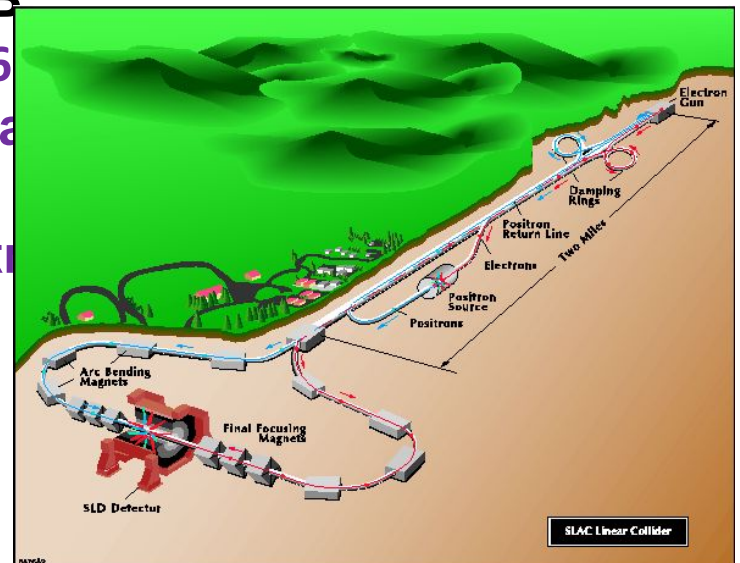
50 GeV для електронів і позитронів, в режимі колайдера в СЦМ
енергія 90 GeV

Продукувалися 3 нобелівські премії: 1976
J/ψ (J/Psi) мезон: 1990 – кваркова структура

– тау
Найд



- 3.2 км



SLAC (SLAC National Accelerator Laboratory)

Google

SLAC National Accelerator Laboratory



Увійти

Прокласти маршрут

Мої місця



A San Francisco, CA, United States

B SLAC National Accelerator Laboratory

Додати пункт призначення - Показати параметри

ПРОКЛАСТИ МАРШРУТ

Запропоновані маршрути

US-101 S і I-280 S 34,7 миль, 36 хвилин
● 3 урахуванням заторів: 35 хвилин

I-280 S 36,3 миль, 37 хвилин
● 3 урахуванням заторів: 37 хвилин

US-101 S, CA-92 W і I-280 S 36,3 миль, 39 хвилин
● 3 урахуванням заторів: 37 хвилин

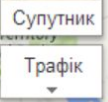
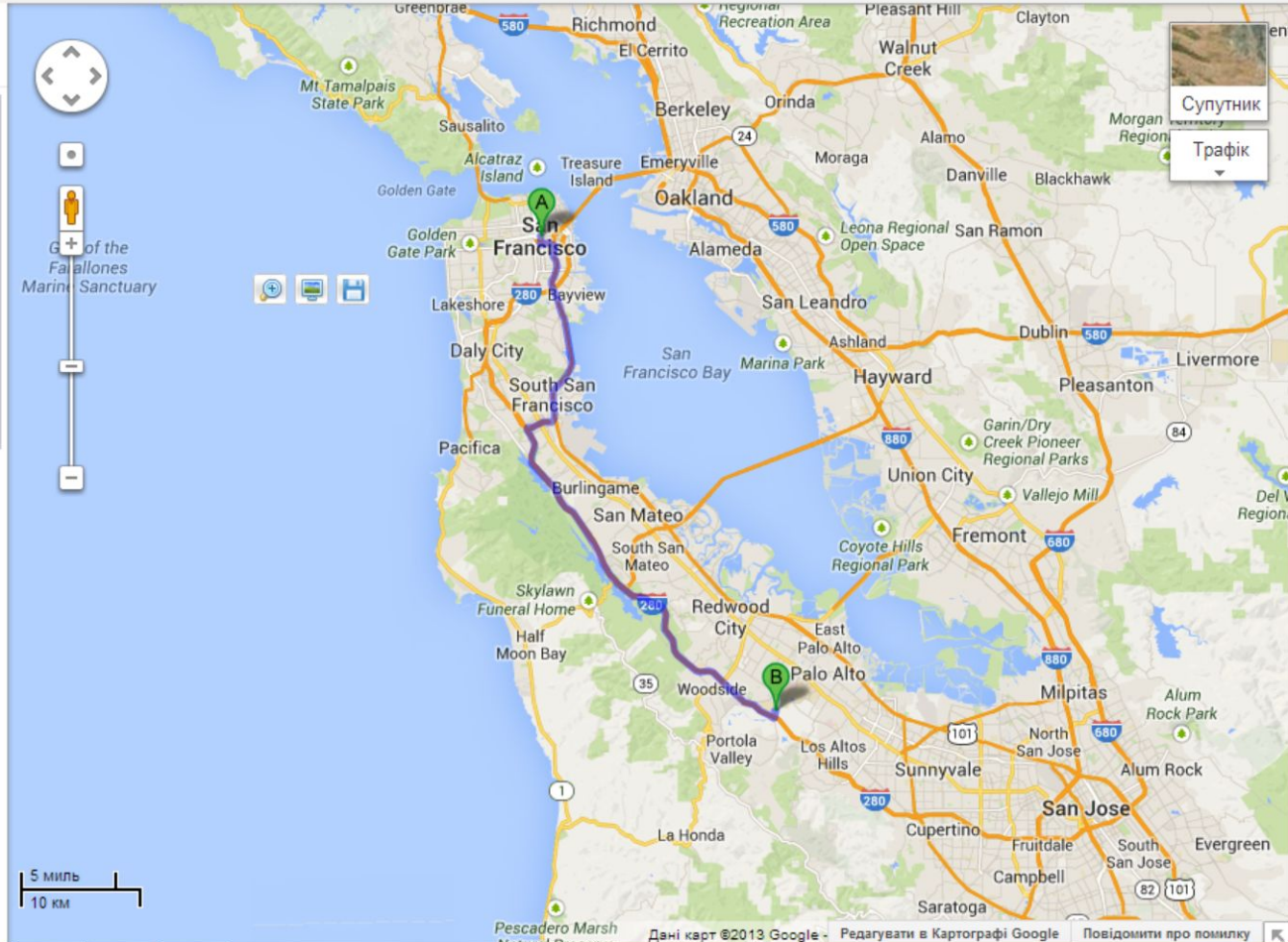
Маршрут автомобілем до
Национальная ускорительная
лаборатория SLAC

3D ▶

На цьому маршруті трапляються дороги
обмеженого користування або приватні
дороги.

A Сан-Франціско, Каліфорнія

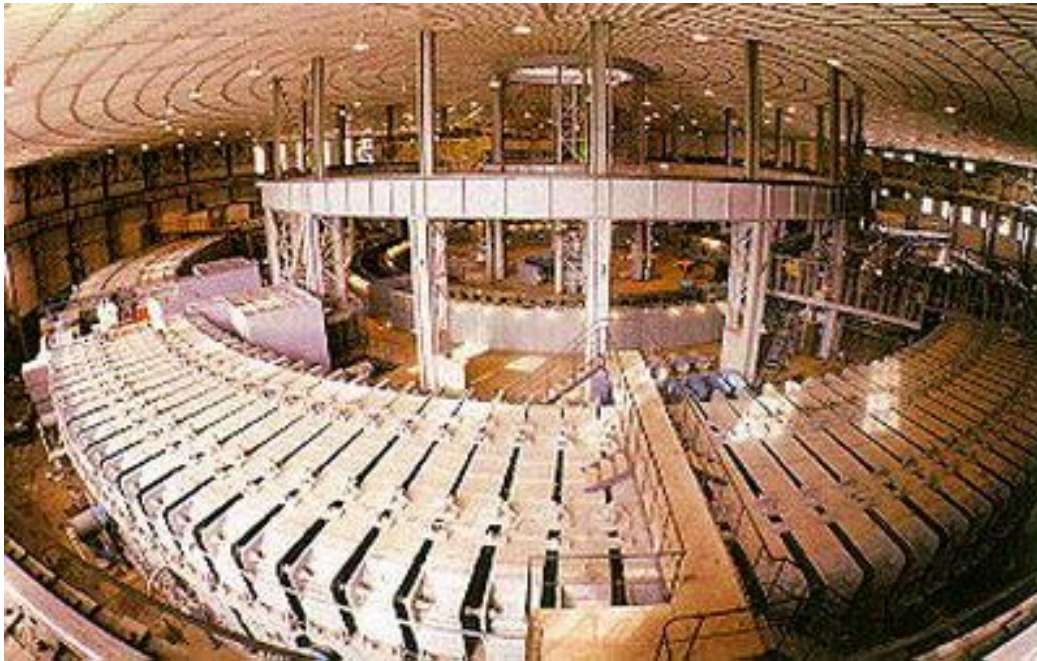
1. Вирушайте на південь по S Van



Історія великих
прискорювачів

Синхрофазотрон, Дубна, СРСР

Протонний синхротрон, Дубна, СРСР
1957 (повна енергія) – 2002, 10 ГеВ



Синхрофазотрон, Дубна, СВСВ

Google

Прокласти маршрут Мої місця

Росія, Московська обл., Дубна

Росія, Москва

Додати пункт призначення - Показати параметри

ПРОКЛАСТИ МАРШРУТ

Запропоновані маршрути

ш. 125 км, 1 година 54 хвилини

• З урахуванням заторів: 1 година 55 хвилин

Дмитровское/А104

Маршрут автомобілем до Москва, Росія

На цьому маршруті трапляються дороги обмеженого користування або приватні дороги.

Дубна
Московська обл., Росія

- Вирушайте на схід у напрямку до Улиця Приборостроителей
- На кільці виконайте з'їзд на Улиця Приборостроителей
- Поверніть праворуч на Новое ш.

20 миль / 20 км

Дані карт © 2013 Google - Повідомити про помилку

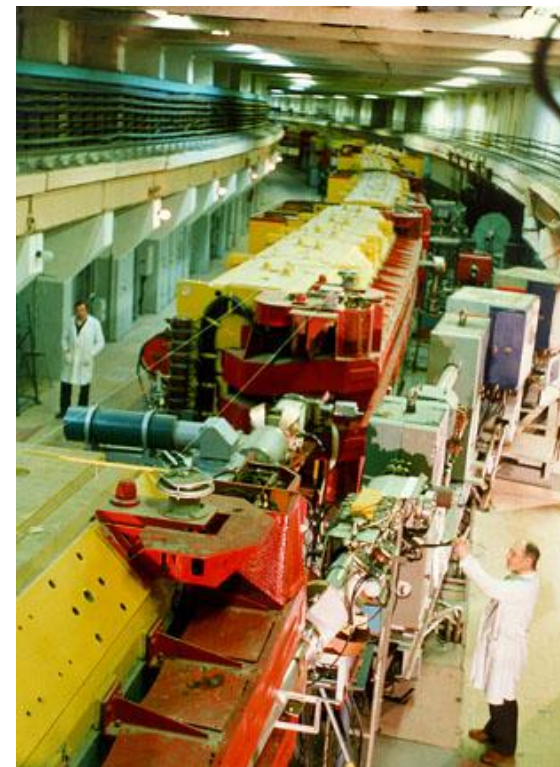
Історія великих
прискорювачів

Синхрофазотрон У-70, Протвино (біля Серпухова), СРСР

Протонний синхротрон, Протвино, СРСР

<http://www.liveinternet.ru/showjournal.php?journalid=1109359&tagid=82941>

1967 (повна енергія 76 Гев) – ..., 70 Гев



Протвино (біля Серпухова)

Google



Увійти

Прокласти маршрут

Мої місця



A Росія, Московська обл., Протвино

B Росія, Москва

Додати пункт призначення - Показати параметри

ПРОКЛАСТИ МАРШРУТ

Запропоновані маршрути

M2 125 км, 1 година 40 хвилин

• З урахуванням заторів: 1 година 39 хвилин

Московское 152 км, 2 години 0 хвилин

• З урахуванням заторів: 1 година 58 хвилин

Большое кольцо/A108 і ш. Киевское/E101/M3

Московское 149 км, 2 години 6 хвилин

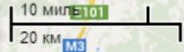
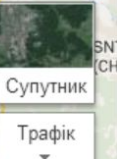
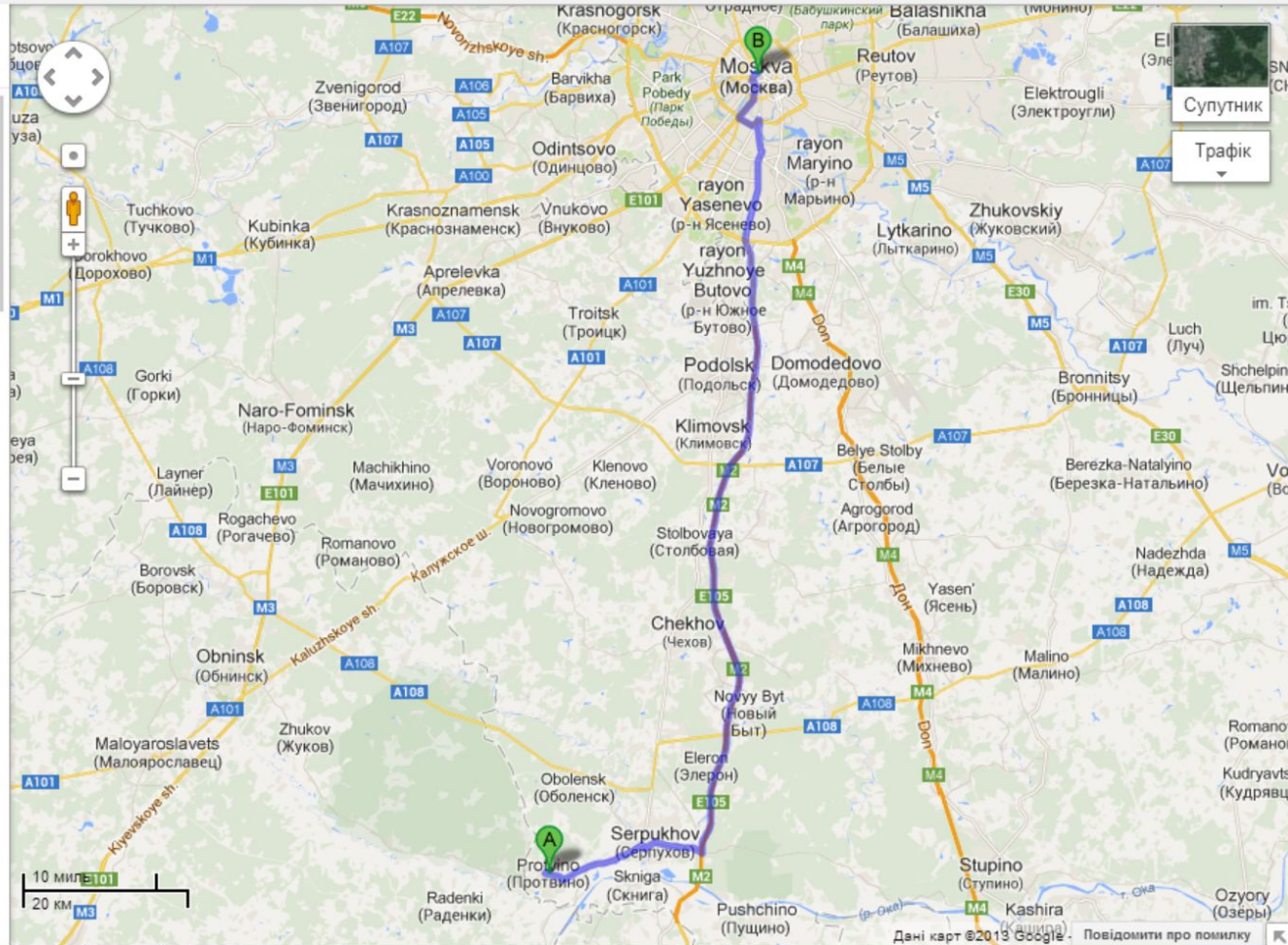
• З урахуванням заторів: 2 години 5 хвилин

Большое кольцо/A108 і M4

Маршрут автомобілем до Москва, Росія

На цьому маршруті трапляються дороги обмеженого користування або приватні дороги.

A Протвино
Московская область, Росія

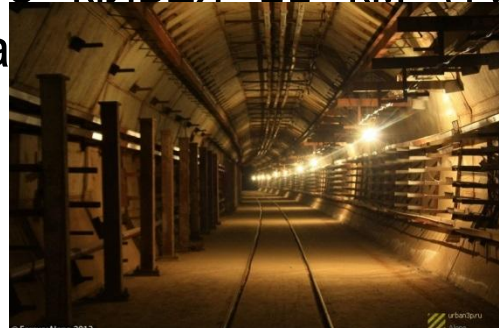


Дані карт ©2013 Google - Повідомити про помилку

Історія великих проектів

Примари СРСР – руїни недобудованого суперколайдера на 3000 ГеВ (УНК – «ускорительно-накопительный комплекс») (1983 - 1994)

Довжина основного кільця 21 км (тунель повністю прорито) V-70



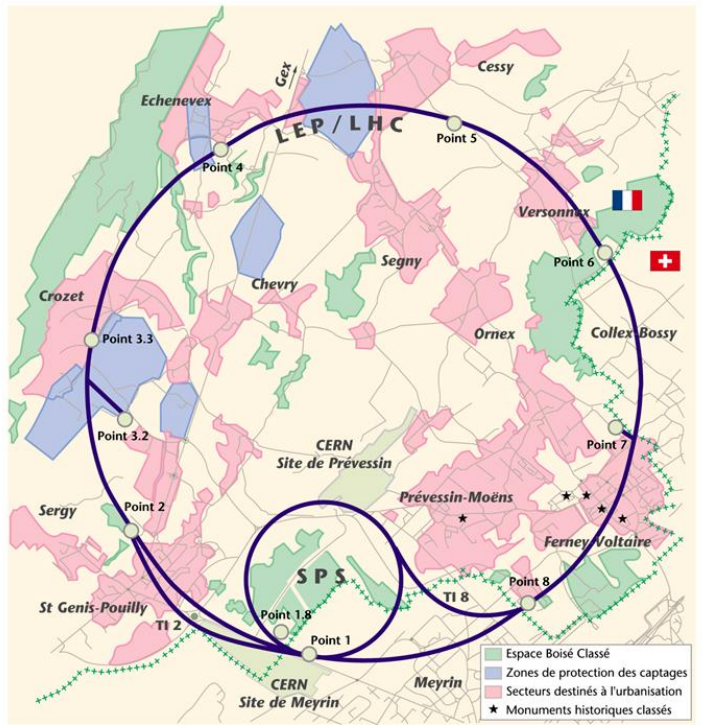
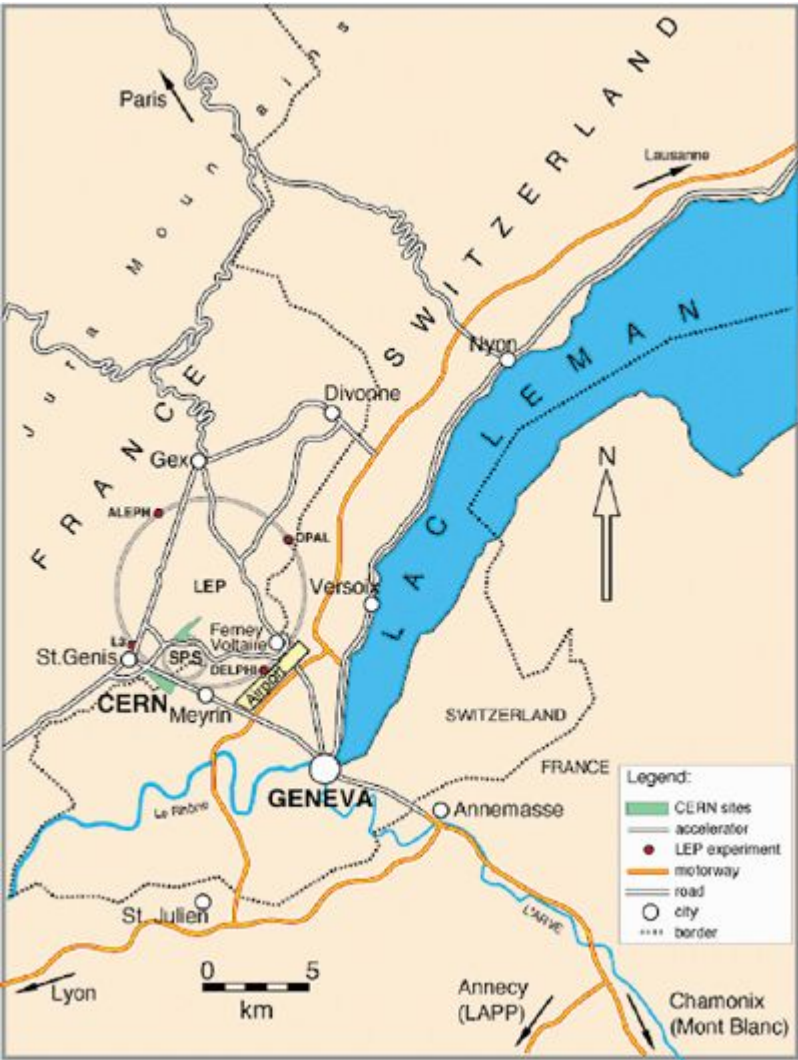
Історія великих природоохорончів ЦЕР



Історія великих природоохоронців

ЦЕРН

Principales zones d'occupation des sols à proximité du LEP



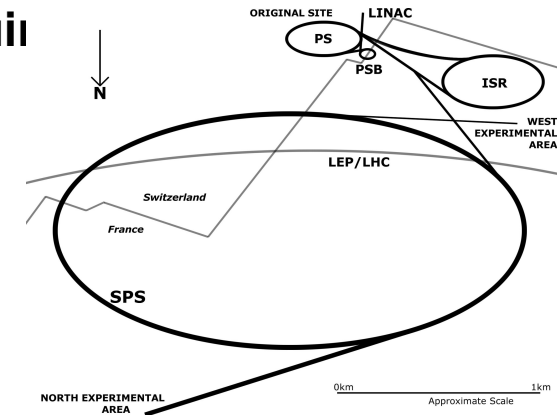
Протонний синхротрон, 28 ГеВ

(Proton Synchrotron), CERN
1959 — ..., 28 ГеВ,
довжина кола 628.3 м



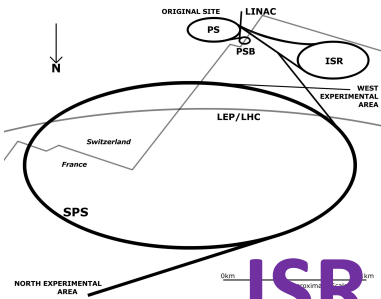
Давно використовується як бустер
для більш потужних прискорювачів

1. Intersecting Storage Rings (ISR)
2. Super Proton Synchrotron (SPS)
3. Large Electron-Positron Collider (LEP)
4. Large Hadron Collider (LHC)



Універсальна машина – може прискорювати протони, антипротони, електрони, позитрони і деякий набір іонів, інтенсивність збільшили з 1959 року в 1000 раз

Відкрито слабкі нейтральні струми в 1974



Історія великих прискорювачів

Адронний колайдер, ISR (Intersecting Storage Rings), CERN

1971 – 1984,

Перший в світі адронний колайдер

Максимальна енергія протонів у ISR - 31.5 GeV, в системі центру мас 62 GeV

Висока світимість для p-p зіткнень – в 1984 р. Отримано $1,4 \times 10^{32} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$

В основному працював в режимі протон-протонного колайдера, а також протон-антипротонних зіткнень, використання дейтронних пучків

Розробка стахастичного охолодження -
Симон Ван дер Меер, в 1984
Нобелівська премія



Супер Протонний Синхротрон, SPS (Super Proton Synchrotron), CERN

1976 – ...,

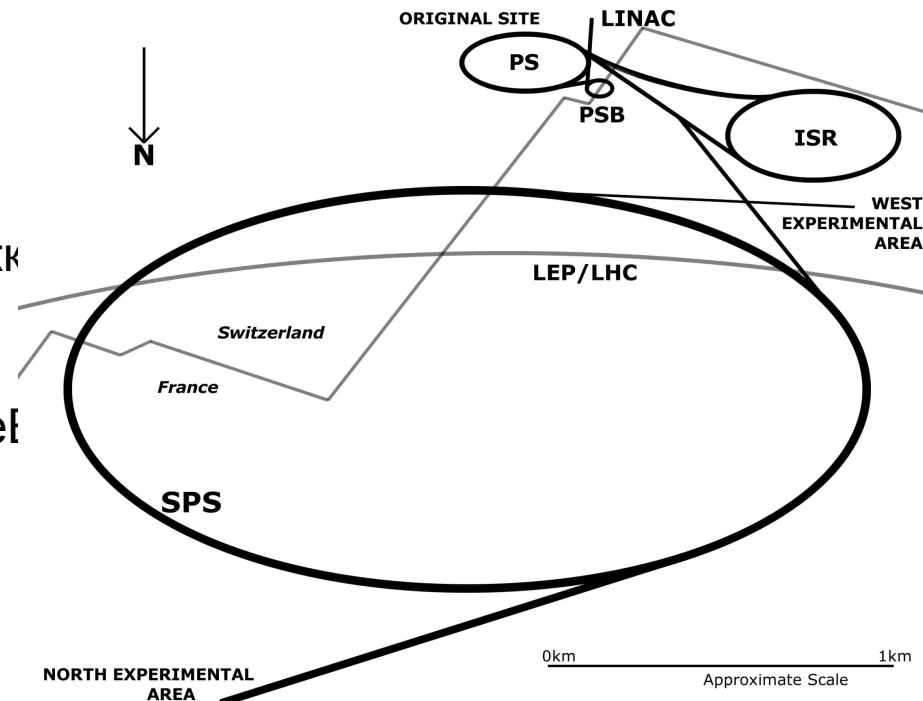
довжина кола 6.9 км, максимальна енергія 400 GeV

1981-1984 – як протон-антипротонний колайдер – назва *Spp̄S*

Прискорював протони, антипротони, електрони, позитрони (як інжектор для LEP - Large Electron-Positron Collider) і важкі іони, зараз виступає фінальним інжектором для LHC (розганяє високоінтенсивні пучки протонів з 26 GeV до 450 GeV)

1983: знаходження W та Z бозонів
(Нобелівська премія 1984 року)

1999: відкриття прямого порушення CP
інваріантності



Великий електрон-позитронний коллайдер,

LEP (Large Electron-Positron Collider), CERN

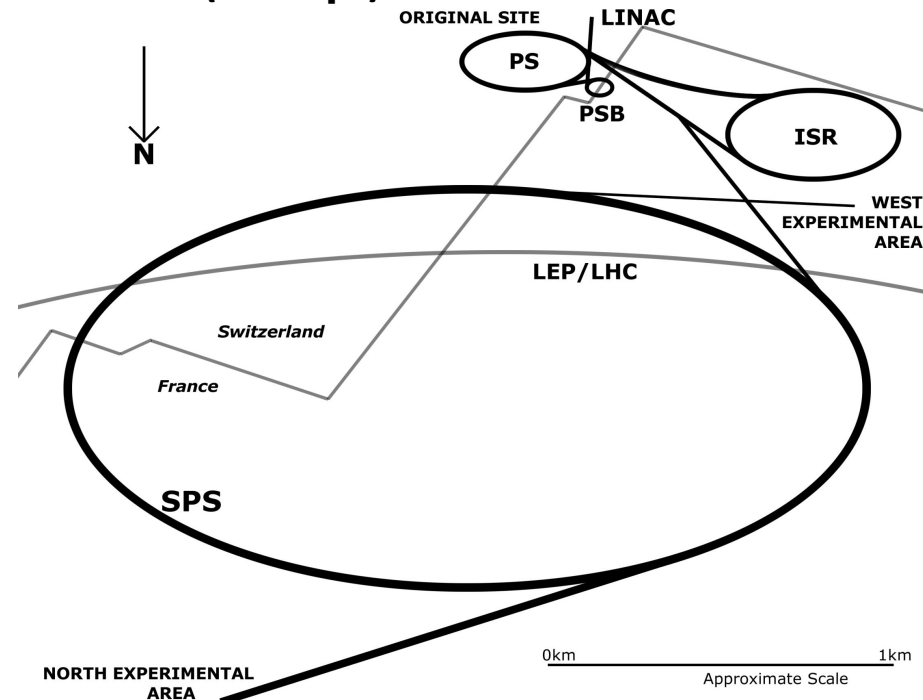
1989 – 2000,

довжина кола 27 км,

максимальна енергія електронів і позитронів - 45 ГеВ (1989 р.),

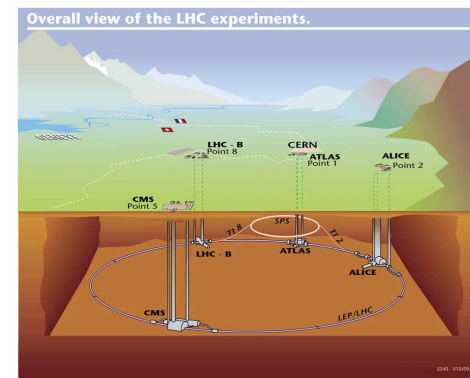
Сумарна енергія - 209 ГеВ (2000 р.)

Уточнювалися характеристики
Стандартної моделі





Історія великих прискорювачів



LHC, CERN

Історія прямо зараз



Історія великих

ТЕВАТРОН

Tevatron, USA, Батавія,

Фермілаб

1983 - 2011,
Синхротрон, колайдер, довжина кола 6.3 км,
максимальна енергія - 980 ГеВ для кожного пучка,

Прискорює протони і антипротони

1995: відкриття t -кварка

1996: отримання атомів антиводню

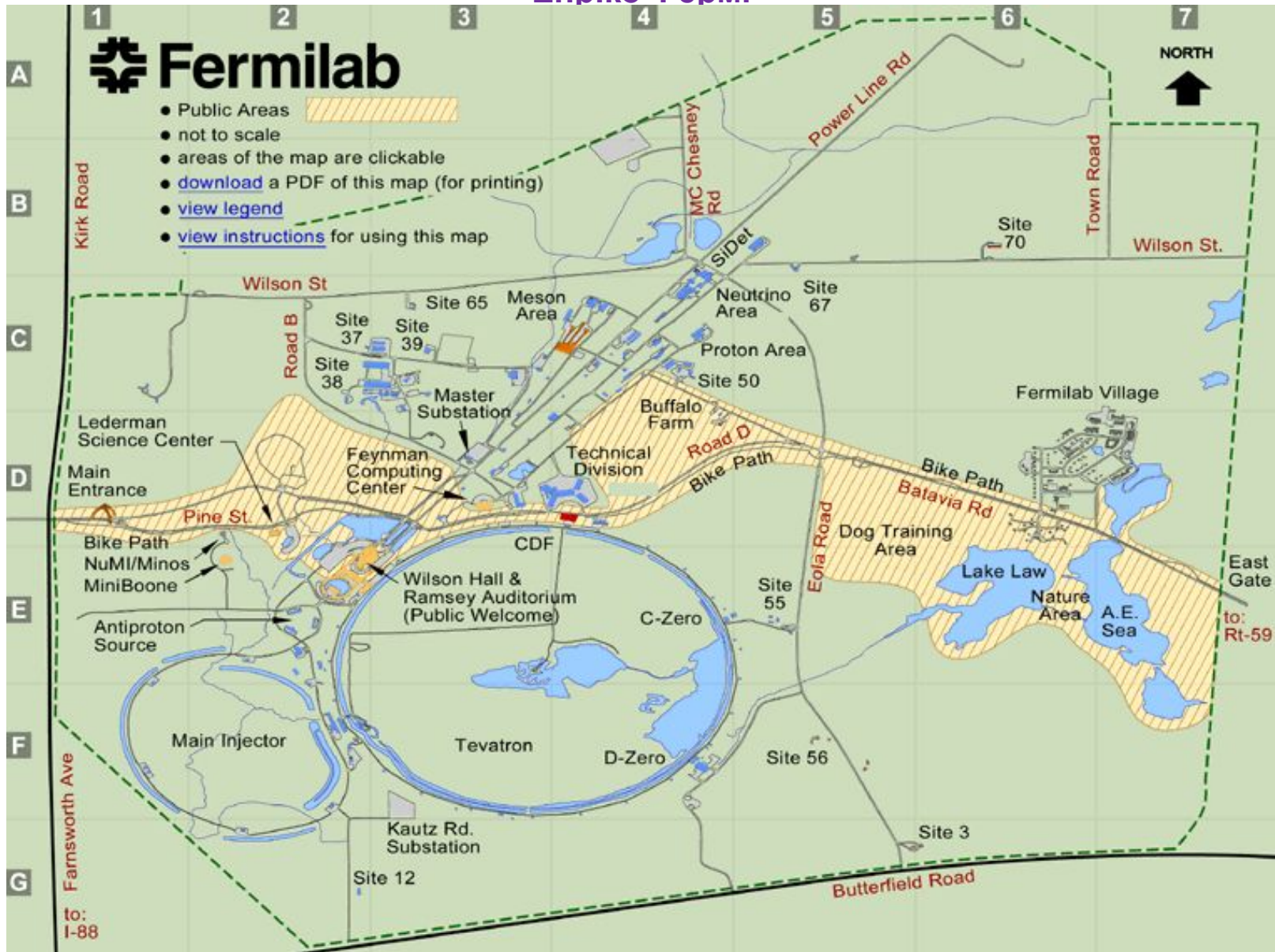
1998: відкриття B_c^+ мезона

...



Фермілаб

Національна прискорювальна лабораторія імені
Енріко Фермі



Фермілаб

Національна прискорювальна лабораторія імені

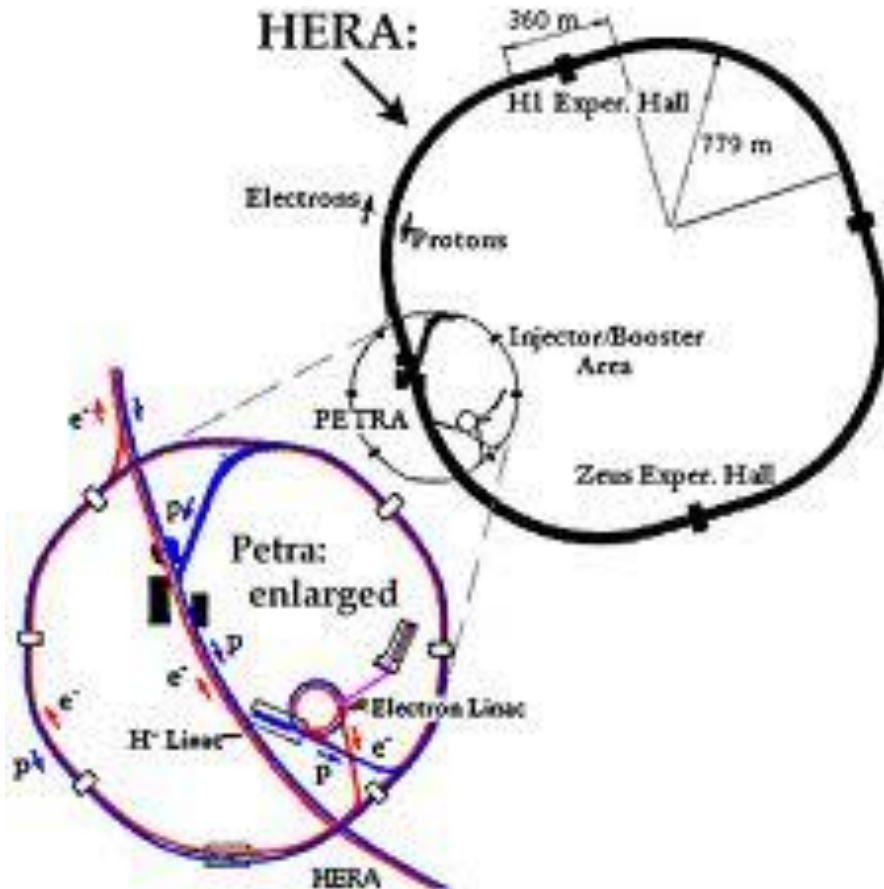


HERA

Hadron-Elektron-Ring-Anlage (Hadron Electron Ring Facility),
DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron), Гамбург

Два кільця: електрони – 27.5 ГеВ, протони – 920 ГеВ

Кільце довжиною більше 6 км



МІКРОТРО Н

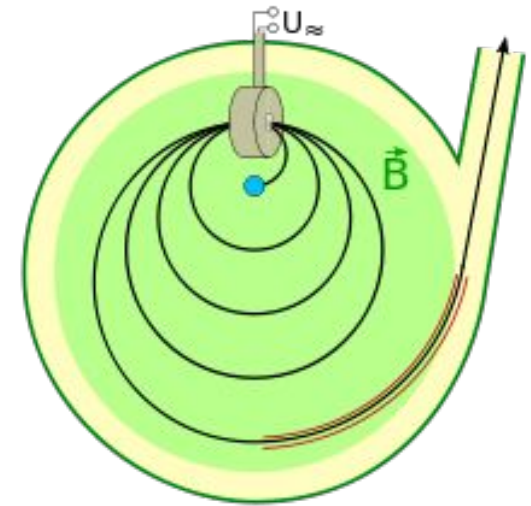
Класичний мікротрон, ідея якого була запропонована в 1944 році Векслером, являє собою круглий дипольний магніт, але на відміну від циклотрона частинки інжектуються не в центрі, а скраю, де встановлені порожнисті прискорюючі електроди. Далі частинки рухаються по колах все більшого радіуса, отримуючи на кожному обороті прирощення енергії таке, щоб нова частота обертання знову була кратна частоті ВЧ-системи.

На 1 оберт порядку 0.5 MeV приріст енергії

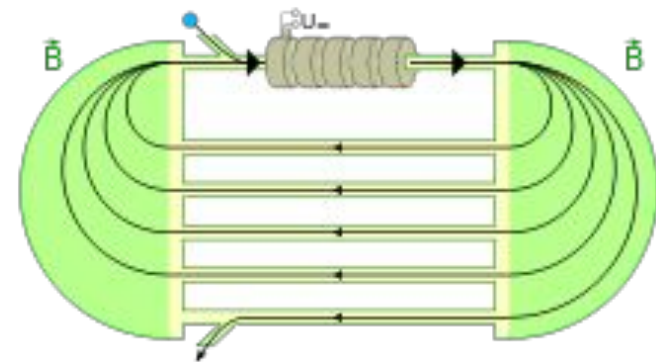
$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi m v}{qB v}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi r}{qBc} = \frac{2\pi E / c}{qBc}$$

$$T = \frac{2\pi E}{qBc^2}$$



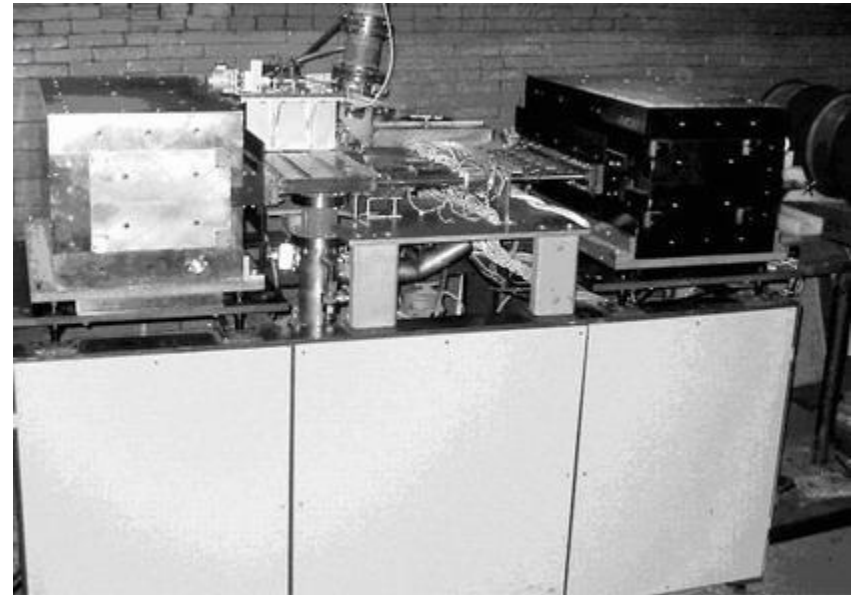
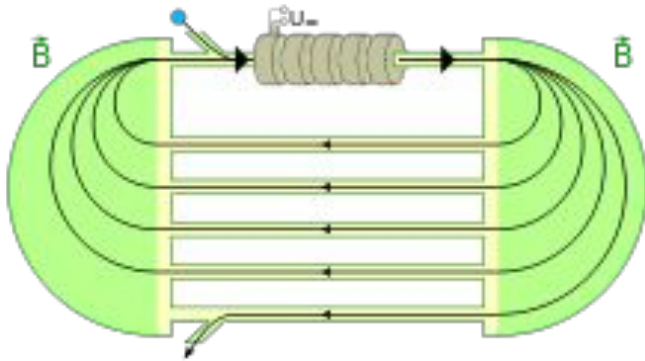
Класична
схема



Розрізний
мікротрон

РОЗРІЗНИЙ МІКРОТРОН

Розрізний
мікротрон
РАМ-55



Імпульсний розрізний мікротрон на енергію 70 МеВ (НДІЯФ МДУ)

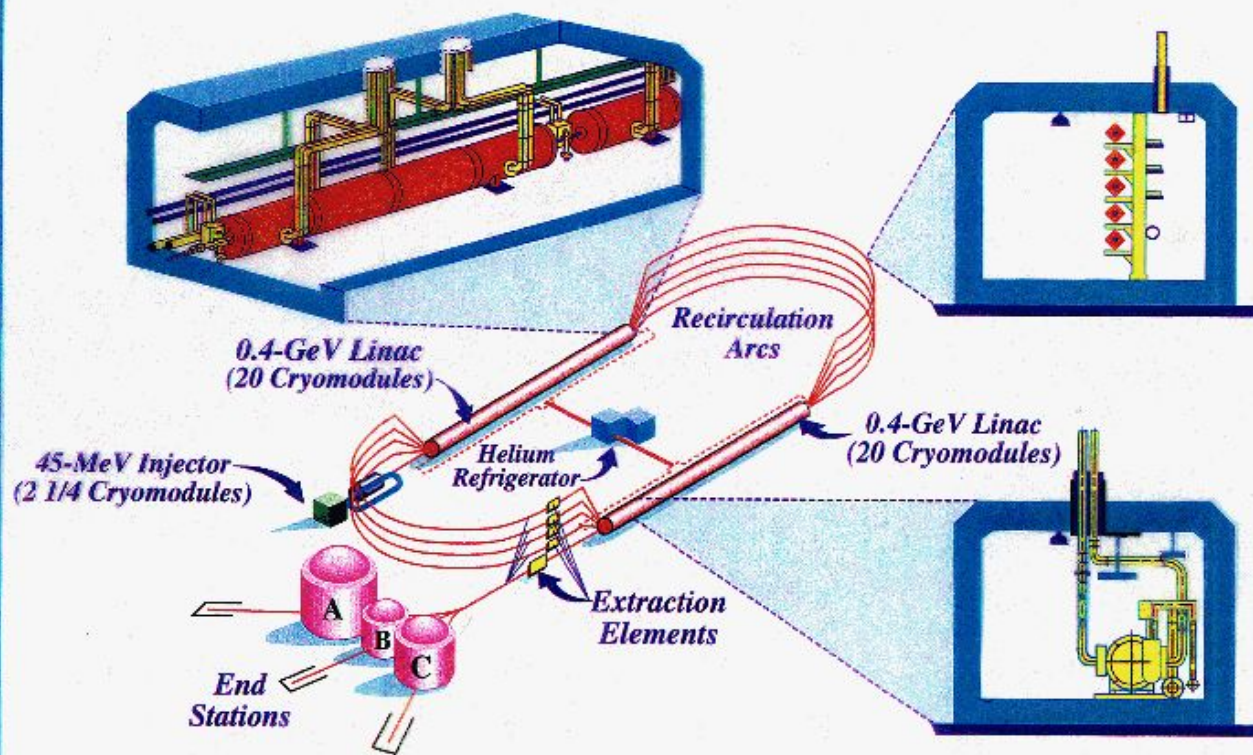
Прискорювач електронів неперервної дії на принципі
квасімікротрона,

CEBAF, 6 GeV (12 GeV), 1400 м

Thomas Jefferson National Accelerator Facility (TJNAF), Jefferson Lab, Jlab, USA

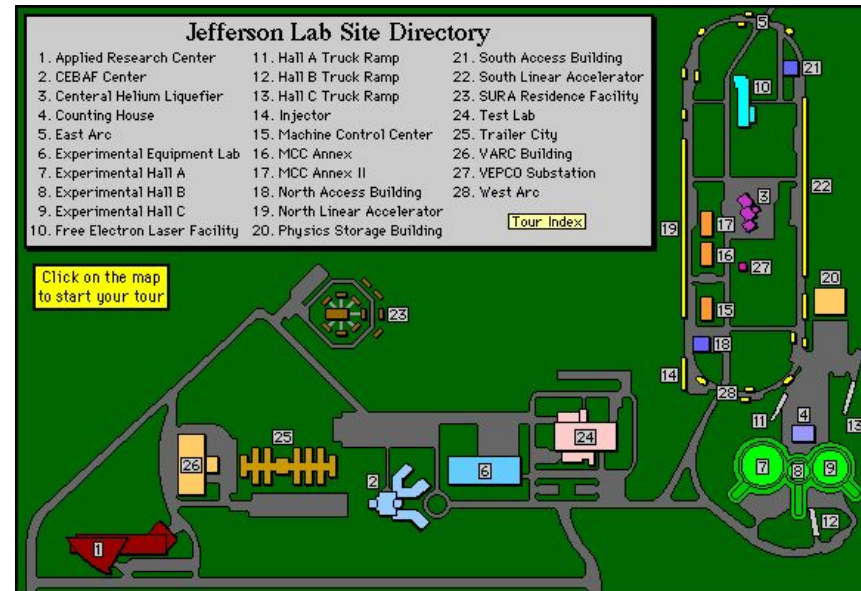
MACHINE CONFIGURATION

CEBAF



CEBAF, 6 GeV (12 GeV), 1400 m

Thomas Jefferson National Accelerator Facility (TJNAF), Jefferson Lab, Jlab, USA



Thomas Jefferson National Accelerator Facility (TJNAF), Jefferson Lab, Jlab, USA

Google

A Нью-Йорк, Сполучені Штати Америки

B Thomas Jefferson National Accelerator Facility

Запропоновані маршрути

I-95 S 395 миль, 6 годин 12 хвилин
● 3 урахуванням затримок: 6 годин 12 хвилин

US-301 S і I-95 S 394 миль, 6 годин 34 хвилини
● 3 урахуванням затримок: 6 годин 38 хвилин

I-78 W і I-95 S 434 миль, 6 годин 57 хвилин
● 3 урахуванням затримок: 6 годин 57 хвилин

Маршрут автомобілем до Лабораторія Джефферсона

Цей маршрут потребує сплати зборів. На цьому маршруті трапляються дороги обмеженого користування або приватні дороги.

A Нью-Йорк

1. Вирушайте на південний захід по **Broadway** у напрямку до **Chambers St**
98 футів
2. На 1 повороті поверніть праворуч на **Chambers St**
0,1 миль
3. На 1 повороті поверніть праворуч на **Church St**
0,3 миль
4. Плавна поверніть ліворуч на **Avenue of the Americas**
0,4 миль
5. Поверніть ліворуч на **Watts St**
0,1 миль
6. Продовжіть рух по **I-78 W/Holland Tunnel**
Продовжіть рух по **I-78 W**
Візд до: Нью-Джерсі
2,2 миль
7. Плавна поверніть праворуч і продовжіть рух по **I-78 W** (знаки Turn right/Left onto 70/Left onto 95)

Дані карт ©2013 Google - Редагувати в Картографі Google | Повідомити про помилку | К

Індукційні прискорювачі

Бетатрон

Зміна магнітного поля призводить до утворення індукovanого електричного поля, яке може прискорювати заряджені частинки

Ідея Відерое (Wideröe) □ перший електронний прискорювач, робота якого базується на магнітній індукції (Donald Kerst, 1940 рік, 2.3 MeV)



D. W. Kerst

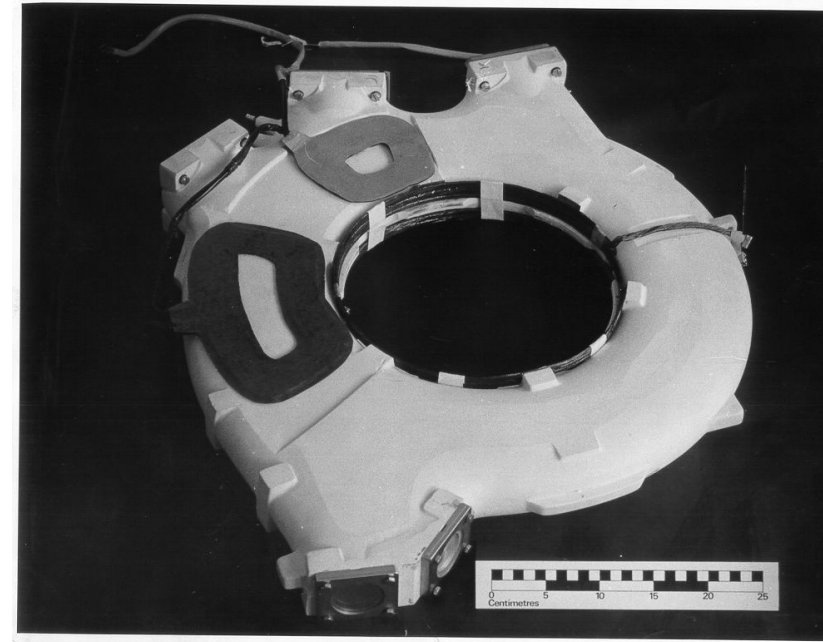
Donald William Kerst

* 1 November 1911, Galena, Illinois

† 19 August 1993 Robert

Індукційні прискорювачі

Бетатрон



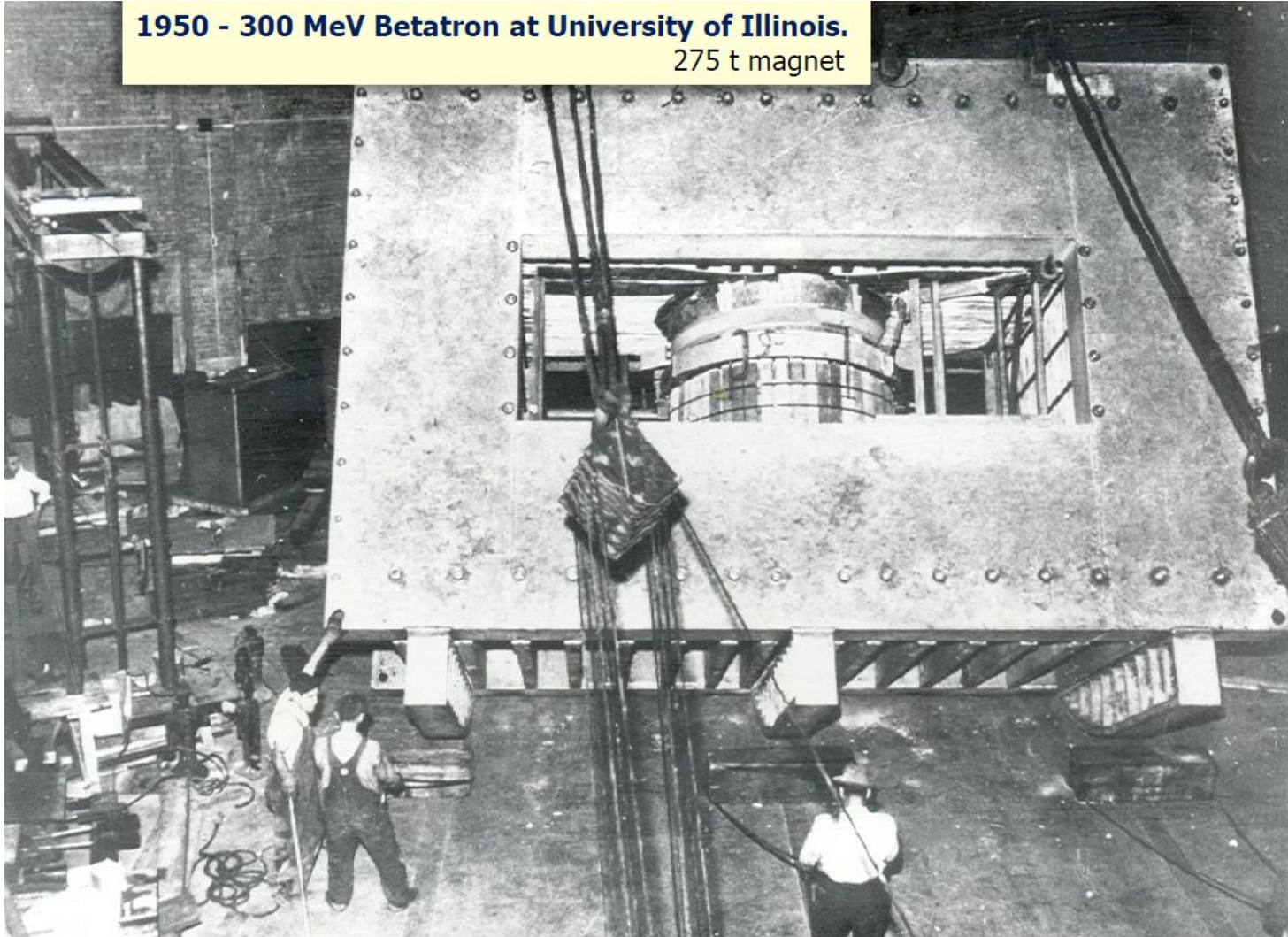
Сталість орбіти досягається при виконанні так званої бетатронної умови:
 $2B_{орб} = \langle B \rangle$, де $\langle B \rangle$ - середнє значення індукції магнітного поля в площині, яка охоплюється орбітою; $B_{орб}$ - індукція магнітного поля на орбіті.

$$pc = eB\rho \quad \frac{dp}{dt} = \frac{1}{c} \frac{e}{2\pi\rho} \frac{\partial\Phi}{\partial t}$$

$B\rho$ – магнітна жорсткість

Індукційні прискорювачі Бетатрон

1950 - 300 MeV Betatron at University of Illinois.
275 t magnet



Бетатрон. Вакуумна камера бетатрона

